

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

**UTILIZAÇÃO DE REALIDADE AUMENTADA
PARA MONTAGENS DE ESTRUTURAS
METÁLICAS: UMA APLICAÇÃO NA
INDÚSTRIA AERONÁUTICA**

LUÍS FERNANDO DE SOUZA CARDOSO

ORIENTADOR: PROF. DR. EZEQUIEL ROBERTO ZORZAL

**CO-ORIENTADORA: PROFA. DRA. FLÁVIA CRISTINA MARTINS
QUEIROZ MARIANO**

São José dos Campos – SP

Dezembro/2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

**UTILIZAÇÃO DE REALIDADE AUMENTADA
PARA MONTAGENS DE ESTRUTURAS
METÁLICAS: UMA APLICAÇÃO NA
INDÚSTRIA AERONÁUTICA**

LUÍS FERNANDO DE SOUZA CARDOSO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração: Tecnologia da Informação e Comunicação

Orientador: Prof. Dr. Ezequiel Roberto Zorzal

São José dos Campos – SP

Dezembro/2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNIFESP São José dos Campos
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

dL953u de Souza Cardoso, Luís Fernando
Utilização de realidade aumentada para montagens
de estruturas metálicas: Uma aplicação na
indústria aeronáutica / Luís Fernando de Souza
Cardoso
a Ezequiel Roberto Zorzal; co-orientador Flávia
Cristina Martins Queiroz Mariano. -- São José dos
Campos, 2019.
91 p.
Augmented Reality use to support metal structures
assembly: an application in aeronautics

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-
Graduação em Mestrado Profissional
Interdisciplinar em Inovação Tecnológica) --
Universidade Federal de São Paulo - Instituto de
Ciência e Tecnologia, 2019.

1. Realidade aumentada. 2. Montagem
estrutural. 3. Indústria aeronáutica. 4.
Visualização de informações. I. Zorzal, Ezequiel
Roberto, orient. II. Martins Queiroz Mariano,
Flávia Cristina, co-orient. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

UTILIZAÇÃO DE REALIDADE AUMENTADA PARA MONTAGENS DE ESTRUTURAS METÁLICAS: UMA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

LUÍS FERNANDO DE SOUZA CARDOSO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração: Tecnologia da Informação e Comunicação.

Aprovado em 17 de dezembro de 2019.

Presidente da Banca:

Prof^ª. Dr^ª. Flávia Cristina Martins Queiroz Mariano

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Ana Carolina Lorena

Prof. Dr. Tiago de Oliveira

Prof^ª. Dr^ª. Denise Stringhini

São José dos Campos - SP
Dezembro/2019

Dedico este trabalho às pessoas que são minha inspiração de vida, meus pais
Demétrio e Goreti e minha avó Berenice.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me iluminar e me dar tranquilidade para seguir com os meus objetivos.

Aos meus pais, Demétrio Edson Cardoso e Maria Goreti Rufino de Souza Cardoso que sempre me motivaram e ampararam durante todo este percurso.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Ezequiel Roberto Zorzal e Profa. Dra. Flávia Cristina Martins Queiroz Mariano por sua disposição, dedicação e paciência em me orientar neste trabalho.

Aos meus amigos Bruno Rodrigo Martins, Lucas Danilo Alves, Luiz Henrique Mok e Victor Petrow pela contribuição durante os cansativos testes realizados ao longo do desenvolvimento.

A Fatec de São José dos Campos por permitir que o trabalho fosse desenvolvido em seu laboratório. E em especial ao Prof. Dr. Alfred Makoto Kabayama que foi meu anfitrião durante os meses de desenvolvimento.

"A simplicidade é a suprema sofisticação."

Leonardo Da Vinci

RESUMO

Dentre os principais desafios de manufatura durante a quarta revolução industrial está a qualidade com que a informação do desenvolvimento do produto chega à linha de montagem. Uma das tecnologias de visualização de informações mais estudada durante as últimas décadas é a Realidade Aumentada (RA) a qual, atualmente, ganha impulso com sua utilização em dispositivos móveis. No entanto, existem dúvidas do setor industrial sobre a maturidade e custo da tecnologia no atendimento de seus processos produtivos, tornando-a assim escassa no ambiente de produção. Neste contexto, o presente trabalho desenvolve uma solução de Realidade Aumentada que atenda aos requisitos de montagem de estruturas para a indústria aeronáutica, comparar sua utilização com os métodos tradicionais de montagem e identificar os ganhos e limitações da tecnologia. Para realizar esta análise, este estudo conduziu uma avaliação de campo com usuários que utilizaram RA para posicionar pequenos suportes em uma estrutura aeronáutica. Após coletar o tempo e medida de posicionamento dos suportes pelos usuários, foi realizada uma análise estatística a fim de comparar o método de posicionamento com RA com um método tradicional utilizando escala métrica. Ao final, este estudo aponta que para montagens de maior complexidade a RA pode oferecer uma solução mais rápida para o posicionamento, ainda que existam algumas limitações de tolerância de posicionamento utilizando a tecnologia. Como trabalhos futuros são recomendadas algumas modificações no aplicativo para reduzir os erros de marcação e o tempo total de utilização.

Palavras-chave: Realidade Aumentada, montagem estrutural, indústria aeronáutica, visualização de informações.

ABSTRACT

Among the main manufacturing challenges during the fourth industrial revolution is the quality with which product development information reaches the assembly line. One of the most studied information visualization technologies is the Augmented Reality which, nowadays, has been promoted by its use in mobile devices. However, the industrial sector still has doubts about the technology maturity and cost to attend production processes, making it scarce in the production environment. In this context, the present paper develops an Augmented Reality application that could attend aeronautical industries' requirements for structural assemblies, analyze statistically its use compared to traditional assembly methods and identify the technology main benefits and limitations to this applicability. To perform this analysis, this study conducted a field evaluation with users who used AR to mark small brackets position in an aeronautical structure. After collecting the time and measurement to positioning the brackets, a statistical analysis was performed to compare the positioning method with AR with a traditional method using metric scale. In the end, this study points out that for higher complexity assemblies AR can offer a faster solution, even though some limitations concerning the positioning tolerance using the technology. As future work, some application modifications are suggested to reduce markup errors and overall usage time.

Keywords: Augmented Reality, structural assembly, aeronautical industry, information visualization.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Exemplo de estrutura semi-monocoque (FAA, 2012).	17
2.1	Virtualidade Contínua, adaptado de Milgram e Kishino (1994).	20
2.2	Dispositivo de visão ótica direta (esquerda) e visão por vídeo (direita). FONTE: Adaptado de Azuma et al. (2001).	23
2.3	Exemplo de projeção em dispositivo portátil. FONTE: Rice et al. (2016).	23
2.4	Exemplo de projeção em superfícies. FONTE: Lima et al. (2017).	24
2.5	Publicações ao longo dos anos.	27
2.6	Publicações por continente.	27
2.7	Aplicações por segmento da indústria.	27
2.8	Objetivos das aplicações.	28
2.9	Dispositivos de projeção das aplicações.	29
2.10	Métodos de rastreamento das aplicações.	29
2.11	Métodos de rastreamento utilizado em cada dispositivo de projeção.	30
2.12	Dispositivo de projeção utilizado em cada setor industrial.	30
2.13	Métodos de rastreamento em cada setor industrial.	31
2.14	Benefícios da RA.	31
2.15	Desafios e limitações da RA.	32
3.1	Ciclo de desenvolvimento da aplicação, adaptado de Preece, Sharp e Rogers (2002).	38
3.2	Estrutura básica para realização dos testes.	40
3.3	Segmento utilizado para realização dos testes.	41

3.4	Malha criada após identificação das superfícies reais.	42
3.5	Local de referência para instanciar o modelo virtual.	42
3.6	Posição inicial de calibração.	47
3.7	Posição final de calibração.	47
3.8	Marcações realizadas durante avaliação de campo.	48
4.1	Modelo 1 - 3D utilizado nos testes.	50
4.2	Modelo 2 - 3D utilizado nos testes.	51
4.3	Modelo 3 - 3D utilizado nos testes.	51
4.4	Modelo 4 - 3D utilizado nos testes.	52
4.5	Modelo 5 - 3D utilizado nos testes.	52
4.6	Referência de posicionamento dos modelos.	53
4.7	Estrutura de objetos do aplicativo.	54
4.8	Código de posicionamento do modelo virtual.	55
4.9	Código de posicionamento do modelo virtual.	55
4.10	Estrutura do ponto de ancoragem referência.	56
4.11	Localização dos pontos adicionais de ancoragem.	56
4.12	Parte do código para localização dos pontos adicionais de ancoragem.	57
4.13	Componentes do <i>Prefab</i> Example Controller.	58
4.14	<i>script</i> ObjectManipulationController.	58
4.15	Modelo opaco durante calibração.	59
4.16	Circulo de referência do objeto virtual.	60
4.17	Vão entre o revestimento real e virtual.	60
4.18	Variação da posição do modelo quando o ponto de referência não está visível.	61
5.1	Modelo rotacionado durante a calibração.	62
5.2	Ajuste do modelo pelo usuário durante a calibração.	63
5.3	Posição do usuário durante a calibração.	64

5.4	Usuário distinguindo o modelo virtual do cenário real.	64
5.5	Usuário destro realizando a marcação.	65
5.6	Usuário canhoto realizando a marcação.	65
5.7	Histograma da variável tempo (em minutos).	66
5.8	Distribuição do tempo de medição (em minutos) por indivíduo.	68
5.9	Distribuição do tempo de medição (em minutos) por modelo.	69
5.10	Gráfico de interação para o tempo médio de medições em 5 Modelos e por 5 Indivíduos.	70
5.11	Gráfico de dispersão por modelo (eixo x) e por Indivíduo na calibração.	72
5.12	Gráfico de dispersão por modelo (eixo x) e por Indivíduo na marcação.	73
5.13	Boxplot da variável ERRO (em mm) das medições obtidas com o uso de RA. . .	74
5.14	Distribuição da variável ERRO (em mm) por indivíduo	75
5.15	Distribuição da variável ERRO (em mm) por indivíduo.	76
5.16	Gráfico de interação para o erro médio de medições em 5 Modelos e por 5 Indivíduos.	77

LISTA DE TABELAS

2.1	Combinação das palavras de pesquisa	26
3.1	Requisitos funcionais da aplicação de RA	39
3.2	Requisitos não funcionais da aplicação de RA	40
3.3	Perfil dos usuários participantes dos testes de campo.	46
4.1	<i>Prefabs</i> utilizados sem alteração	54
5.1	Medidas descritivas para a variável tempo (em minutos).	66
5.2	Medidas descritivas de tempo (em minutos) para cada indivíduo em estudo. . .	67
5.3	Medidas descritivas de tempo (em minutos) para cada modelo em estudo. . . .	68
5.4	Análise descritiva de médias de tempo (em minutos) por tipo de modelo e por indivíduo.	71
5.5	Medidas descritivas para a variável tempo (em minutos).	73
5.6	Medidas descritivas de erro (em mm) para cada indivíduo em estudo.	75
5.7	Medidas descritivas de erro (em mm) para cada modelo.	76

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 Contextualização	16
1.2 Questões de pesquisa	18
1.3 Objetivos	18
1.4 Organização do texto	19
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Fundamentação teórica	20
2.1.1 Definições e Taxonomia	20
2.1.2 Realidade Aumentada	21
2.2 Trabalhos correlatos	24
2.3 Revisão sistemática	25
2.3.1 Metodologia	25
2.3.2 Resultados	26
2.3.3 Discussão dos resultados	33
2.3.4 Considerações finais	35
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Definição dos requisitos	39
3.2 Design	40
3.3 Protótipo	41

3.4	Avaliação por inspeção	43
3.5	Avaliação de campo	45
3.5.1	Procedimento de avaliação de campo	45
3.6	Análise estatística	48
3.6.1	Conjunto de dados	48
3.6.2	Testes estatísticos	49
CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO		50
4.1	Desenvolvimento dos modelos	50
4.2	Desenvolvimento do aplicativo	53
4.3	Correções das avaliações por inspeção	59
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO		62
5.1	Aplicativo	62
5.2	Análise estatística	66
5.2.1	Análise do tempo de realização da atividade	66
5.2.2	Análise do erro de posicionamento	73
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO		78
6.1	Contribuições	78
6.2	Inserção social	79
6.3	Perspectivas Futuras	79
6.4	Lista de publicações	80
REFERÊNCIAS		81
GLOSSÁRIO		87
ANEXO A – APROVAÇÃO COMITÊ DE ÉTICA		88

ANEXO B – PARTICIPAÇÃO SVR	89
ANEXO C – APRESENTAÇÃO SVR	90
ANEXO D – PUBLICAÇÃO COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING	91

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Em um cenário econômico de mudanças constantes, as empresas tendem a investir em inovação de produtos e processos a fim de reduzir custos e agregar valor para o cliente (CHAN, 2005). Estas duas formas de inovação são definidas como inovação tecnológica (CHU; ANDREASSI, 2011). Nos últimos anos, diversos estudos foram elaborados com a finalidade de identificar processos para gerir a inovação tecnológica e verificar sua aplicação.

No setor de manufatura, a maior parte das publicações sobre inovações está na integração produto/processo, seguido por exclusivamente produto e com uma parcela muito inferior de inovações exclusivas de processo (BECHEIKH; LANDRY; AMARA, 2006). Apesar de um menor número de publicações focadas em inovações de processos frente às de produto, aquelas são essenciais para a personalização dos itens manufaturados com pouco ou nenhum impacto ao sistema produtivo (MEYERS, 1999).

Dentre as diversas ferramentas que auxiliam a personalização de itens manufaturados com baixo impacto no processo produtivo, este trabalho destacará a Realidade Aumentada (RA). A escolha do sistema ocorreu pela combinação de dois pontos ressaltados na literatura. Primeiramente, a tecnologia foi inicialmente desenvolvida para aplicações industriais, devido ao seu elevado custo (AZUMA, 2016). Ainda que atualmente a tecnologia tenha se tornado acessível a um percentual significativo da população e apresente mais de cinquenta anos de pesquisas comprovando seus benefícios, as aplicações na indústria são limitadas (PALMARINI et al., 2018).

A indústria aeronáutica foi escolhida para a elaboração deste trabalho pois apresenta grande complexidade, visto que possui elevado número de pequenos componentes montados muito próximos uns aos outros, em regiões confinadas, e que em muitos casos requerem a utilização de força para realizar a deformação plástica dos prendedores de fixação. Esta combinação,

inviabiliza a aplicação de soluções automatizadas.

A montagem estrutural de uma aeronave compreende a união da estrutura básica (revestimento, longarinas, cavernas e perfis) e a complementação com suportes para encaminhamento de tubos e cabos ou fixação de equipamentos, conforme ilustrado na Figura 1.1.

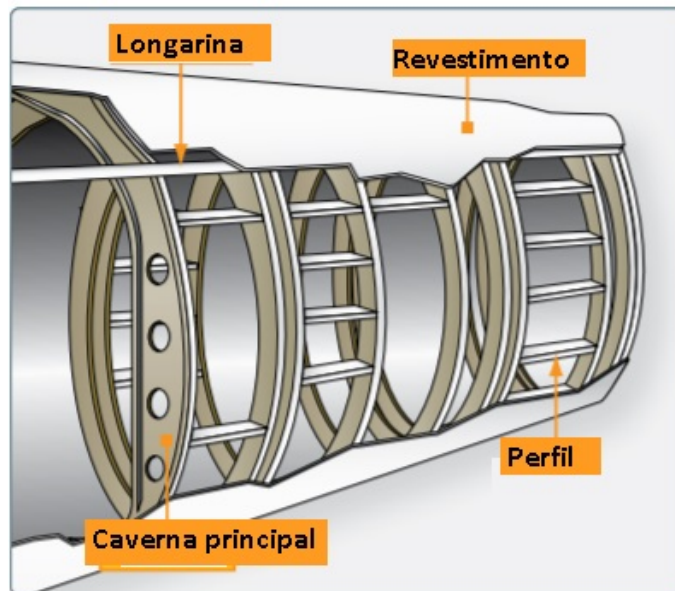


Figura 1.1: Exemplo de estrutura semi-monocoque (FAA, 2012).

Ano após ano, novos aprimoramentos são lançados no mercado aeronáutico exigindo que mais suportes sejam incluídos para fixação de cabos, tubos ou equipamentos. Aliado a este fator, a personalização do produto para atender a necessidade de determinados clientes também aumenta a complexidade do produto e incrementa significativamente o tempo total de montagem, visto que personalizações, de uma forma geral, não podem ocorrer em montagens paralelas.

Conforme observado na indústria, a montagem de suportes pode ser realizada de quatro maneiras distintas:

- Cotas de desenho: apesar das cotas não aumentarem a complexidade do produto elas representam um aumento do tempo de execução, pois devem ser medidas a cada montagem. Neste modelo o operador deve identificar superfícies de referência e medir a distância até o ponto de posicionamento do suporte.
- Gabaritos de montagem: esta solução é mais rápida para a operação que medir o produto, porém tem um valor elevado, visto que os gabaritos são únicos para cada montagem e devem ser confeccionados do mesmo material que o produto para eliminar erros devido à dilatação térmica. Assim como as cotas, o operador deve identificar superfícies de referência para fixar tais gabaritos.

- **Montagem furo-furo:** nesta forma, componentes da estrutura básica devem passar por um processo de preparação, antes de serem montados, a fim de criar os furos onde os suportes serão fixados. Este método cria um processo produtivo adicional na fabricação do componente primário, além de aumentar significativamente a complexidade do produto, visto que peças de mesma forma devem ser diferentemente identificadas caso possuam diferentes furos de referência de montagem. Associado a este fato, furos abandonados na estrutura básica quando não utilizados podem influenciar o surgimento de trincas, reduzindo assim o ciclo de vida do produto.
- **Robôs para posicionamento e fixação de componentes:** este método pode ser mais eficiente que todos os demais, no entanto exige uma grande área livre para a movimentação dos braços do robô, desta forma não sendo possível sua aplicação em regiões confinadas. De uma forma geral esta solução apresenta um valor de aquisição superior às demais.

Neste cenário, a utilização de RA pode ser uma solução para reduzir impactos operacionais do aumento da complexidade do produto final, pois não necessita de grande área para ser utilizada, de gabaritos feitos em materiais especiais ou de inclusão de um processo produtivo adicional.

1.2 Questões de pesquisa

Este trabalho visa responder à seguinte pergunta: a RA pode ser utilizada como ferramenta de apoio à complementação de estruturas aeronáuticas, na inserção de complementos como suportes, em substituição aos métodos tradicionais?

Para responder à questão de pesquisa um estudo de caso foi realizado em uma estrutura aeronáutica, projetando o posicionamento de pequenos suportes. Ao realizar os testes, as seguintes perguntas foram respondidas:

- A RA pode ser utilizada como um método alternativo aos observados na indústria?
- Qual a tolerância de posicionamento da projeção?

1.3 Objetivos

Este projeto tem como objetivo geral validar a utilização de soluções de RA em um cenário de montagem manual de alta complexidade. Para atender ao objetivo, foi desenvolvido um apli-

cativo para realizar a projeção de suportes virtuais sobre uma estrutura aeronáutica real. Em seguida, foi realizado um estudo de caso em um contexto de manufatura aeronáutica. Visando atingir o objetivo geral, o presente trabalho propôs como objetivos específicos: identificar os principais métodos de rastreamento, bibliotecas de desenvolvimento e dispositivos de projeção; a partir de um método e dispositivo selecionado, analisar a variação da projeção em relação à real posição do objeto, comparar a utilização da tecnologia aos métodos tradicionais de montagem manual.

1.4 Organização do texto

O texto está composto por seis capítulos. Este primeiro referente a introdução com o objetivo de contextualizar o leitor sobre a contribuição do trabalho à ciência, a apresentação dos objetivos e as questões de pesquisa. Em seguida, o Capítulo 2 apresenta os conceitos de RA, os trabalhos correlatos identificados durante a pesquisa e o estado da arte da tecnologia para ambientes de produção. O Capítulo 3 mostra os materiais utilizados e a metodologia do trabalho. O Capítulo 4 descreve em detalhes o desenvolvimento dos modelos virtuais e do aplicativo. O Capítulo 5 apresenta os resultados dos testes de campo e a análise estatística dos dados coletados, discutindo cada resultado e percepção dos usuários. Por fim, o Capítulo 6 apresenta a conclusão do estudo e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentação teórica

2.1.1 Definições e Taxonomia

Para entender o conceito de RA é necessário antes descrever o conceito de Realidade Misturada (RM). RM é a descrição genérica da interação entre objetos reais e virtuais em diferentes intensidades. A Figura 2.1 retrata a classificação de RM conforme a percepção de objetos reais e virtuais pelo usuário (MILGRAM; KISHINO, 1994).

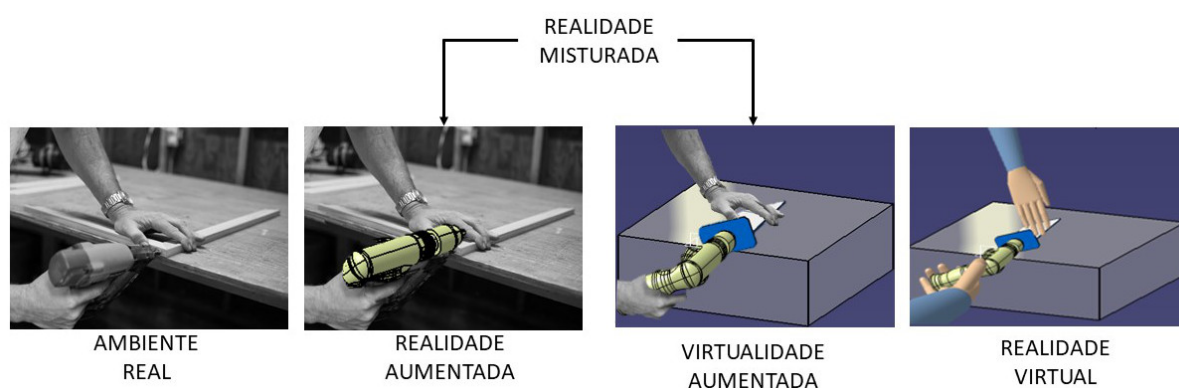


Figura 2.1: Virtualidade Contínua, adaptado de Milgram e Kishino (1994).

A tecnologia em que o usuário tem percepção apenas de objetos virtuais é classificada como Realidade Virtual (RV). Segundo Azuma (1997), na RV o usuário deve estar inteiramente isolado do ambiente real, em uma imersão no ambiente sintético. No entanto, segundo Tori, Kirner e Siscoutto (2006), a RV não necessariamente precisa ser imersiva, mas pode ser considerada também em aplicações onde o usuário é parcialmente imerso ao ambiente virtual, utilizando monitores ou projeções. Desta forma, definindo a tecnologia como aplicações computacionais que permitem que o usuário navegue e interaja, em tempo real, com um ambiente tridimensional gerado por computador, usando dispositivos multisensoriais.

À medida em que a tecnologia avança, pode eventualmente tornar-se menos perceptível a definição se o mundo primário que está sendo experimentado é de fato predominantemente real ou virtual. Neste ponto a tecnologia pode ser classificada como Virtualidade Aumentada (VA) (MILGRAM; KISHINO, 1994)

A RA é a forma menos obstrutiva, onde o usuário não está imerso em um ambiente sintético, mas sim interagindo objetos virtuais com o mundo real (ZALDÍVAR-COLADO et al., 2017). Segundo Azuma (1997), a tecnologia deve atender a três requisitos: combinação do real com o virtual; interação em tempo real; e representação em três dimensões. Billinghurst, Clark e Lee (2015) complementa que a RA não se limita à sobreposição de imagens virtuais, geradas por computador, sobre objetos físicos, mas compreende também experiências auditivas e hápticas.

O posicionamento e orientação do objeto virtual correto no ambiente é definido como registro, enquanto a forma como o elemento se desloca e interage com o usuário é o rastreamento (TORI; HOUNSELL, 2018). Todo sistema de RA deve executar as duas tarefas de forma constante para assegurar a coerência entre o virtual e o real. Para que os objetos virtuais sejam representados no ambiente real, seu posicionamento e orientação deve ser fixado baseado em alguma característica do próprio ambiente, podendo ser rastreado por sensores, capturas de imagem ou geolocalização (BILLINGHURST; CLARK; LEE, 2015).

Tori e Hounsell (2018) definem que os sistemas de RA são divididos em três módulos: entrada, responsável pela captura (por imagem ou sensoramento) do cenário real onde os objetos virtuais serão projetados; processamento, responsável pelo posicionamento, movimentação e interação do objeto virtual; e saída, responsável por renderizar (visualmente ou hapticamente) os objetos virtuais.

2.1.2 Realidade Aumentada

Diversas formas de classificação das técnicas de RA podem ser utilizadas. Billinghurst, Clark e Lee (2015) destacam a classificação conforme método de rastreamento. Nesta classificação são apresentadas cinco diferentes categorias:

- Rastreamento magnético: nesta forma, um dispositivo elétrico (contendo bobinas) gera três campos magnéticos alinhados no espaço em ângulos retos entre si e um sensor, acoplado ao dispositivo do módulo de saída, mede a força relativa de cada campo para fornecer a posição e orientação do objeto (XUE; ZHAO; TAN, 2012; WU; LIN; TSAI, 2016).
- Rastreamento baseado em visão: o método mais frequentemente aplicado é baseado

na utilização de marcadores no ambiente. Estes marcadores são identificados por uma câmera e comparados com padrões previamente definidos (KHAN; ULLAH; RABBI, 2015). Alguns sistemas também podem utilizar características do próprio ambiente como marcadores, conhecido como *Natural Feature Tracking* (NFT), estas características identificadas são utilizadas para calcular a posição do sistema (FRAGA-LAMAS et al., 2018). Por fim, alguns métodos como *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) e *Parallel Tracking and Mapping* (PTAM) permitem que o sistema de RA calcule sua posição mesmo sem conhecer previamente o ambiente (DAVISON et al., 2007), realizando iterações de mapeamento e rastreamento para que o sistema calcule sua posição (KLEIN; MURRAY, 2007).

- Rastreamento inercial: esta forma utiliza sensores como giroscópio, magnetômetro e acelerômetro para determinar a orientação relativa e a velocidade de um sistema de RA em três graus de liberdade (BILLINGHURST; CLARK; LEE, 2015).
- Rastreamento utilizando o sistema de posicionamento global (GPS - Global Positioning System) para calcular a posição do sistema de RA: esta forma de rastreamento é majoritariamente utilizada para ambientes externos devido ao erro de até 3m que pode ser ocasionado devido ao próprio sistema (TORI; KIRNER; SISCOOTTO, 2006; GROENEGRESS; RITZ, 2014).
- Rastreamento utilizando múltiplos métodos: esta categoria é utilizada para reduzir erros (SCHALL; ZOLLMANN; REITMAYR, 2013) ou ampliar o alcance do rastreamento (HAN; ZHAO, 2017) e é composta pela combinação entre os métodos apresentados anteriormente.

Para Azuma et al. (2001), as técnicas de RA também podem ser classificadas conforme o dispositivo utilizado no módulo de saída. Desta forma, elas são divididas em três categorias:

- Projeção em dispositivos vestíveis, óculos e capacetes: esta categoria é dividida em dois grupos, de visão ótica direta ou por vídeo. A visão ótica direta é aquela em que a projeção dos elementos virtuais acontece sobre uma lente semi-transparente, desta forma o ambiente real é visto através da lente. Os sistemas de visão ótica por vídeo possuem uma câmera acoplada ao dispositivo, sendo assim o usuário tem uma visão do mundo real e virtual sob uma lente opaca. A Figura 2.2 representa os dois grupos.

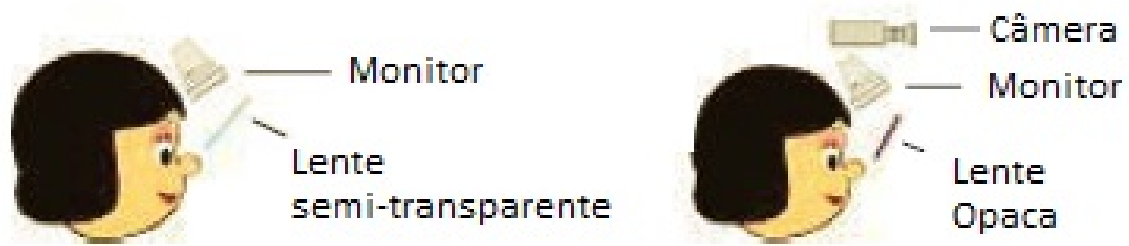


Figura 2.2: Dispositivo de visão ótica direta (esquerda) e visão por vídeo (direita). FONTE: Adaptado de Azuma et al. (2001).

- Projeção em dispositivos portáteis, como smartphones ou tablets: nestes sistemas a câmera do dispositivo captura a imagem do mundo real e o dispositivo faz a compilação das imagens virtuais projetando-as em seu monitor. A Figura 2.3 representa uma aplicação projetada em um dispositivo portátil.



Figura 2.3: Exemplo de projeção em dispositivo portátil. FONTE: Rice et al. (2016).

- Projeção direta em objetos reais: neste tipo de projeção nenhum dispositivo de visualização é necessário, porém este sistema necessita de uma superfície para a projeção do objeto virtual. A Figura 2.4 mostra uma aplicação sobre uma superfície.



Figura 2.4: Exemplo de projeção em superfícies. FONTE: Lima et al. (2017).

2.2 Trabalhos correlatos

A montagem manual utilizando RA tem sido amplamente divulgada na literatura, ainda que em sua maioria, utilizando marcadores artificiais (WANG et al., 2018b). Na indústria aeronáutica sua maior utilização ocorre em processos de montagem mecânica, treinamento de pessoas e inspeções de qualidade (CARDOSO; MARIANO; ZORZAL, 2019).

Dentre os principais trabalhos correlatos identificados na indústria aeronáutica, Suárez-Warden et al. (2015) propuseram uma avaliação da tecnologia para montagens de pequenas estruturas aeronáuticas utilizando um dispositivo vestível e marcadores. Como resultado os autores identificaram um menor tempo de execução da atividade e questionaram sobre os custos associados na implementação da tecnologia. No entanto, o estudo aborda apenas testes genéricos de montagem não avaliando o impacto da ocultação do marcador durante a realização da tarefa.

Xu et al. (2017) apresentaram uma aplicação sem marcador para montagem de grandes estruturas aeronáuticas. Apesar de discutir em seu trabalho sobre a acuracidade da projeção, sua aplicação é limitada a grandes estruturas, pois utiliza um projetor que necessita ficar distante do cenário de projeção, sendo assim inviável para regiões internas.

Em outros ambientes de produção alguns estudos sobre acuracidade de projeções sem marcadores também foram realizados. Wang et al. (2018a) descrevem uma melhoria no processo de rastreamento tridimensional utilizando um dispositivo móvel com um sensor de profundidade acoplado. Embora obtenha resultados significativos com esta solução, ela apresenta dificuldades

para a mobilidade do usuário devido ao dispositivo adicional que deve ser utilizado. Os dados obtidos no estudo foram coletados em um laboratório, sendo interessante reproduzi-los em um ambiente produtivo a fim de avaliar variações devido à luminosidade. Também não foi avaliado o quesito tempo neste estudo para comparar a nova tecnologia aos processos tradicionais.

Na análise de eficiência da utilização de RA em ambientes produtivos, Holm et al. (2017) estudaram a variável tempo e erro (na forma de realizar uma atividade) para comparar com um processo tradicional de inspeção na indústria automobilística. Assim como em Wang et al. (2018a), o experimento ocorreu em ambiente controlado e utilizando uma solução sem marcadores. Os resultados obtidos por Holm et al. (2017) apresentaram uma redução no tempo médio de realização da atividade e na quantidade de erros na forma de realizar a medição quando utilizada RA, no entanto seu experimento não levou em consideração erros de posição do objeto virtual devido à acuracidade da projeção.

2.3 Revisão sistemática

2.3.1 Metodologia

Para investigar aplicações de RA na indústria uma revisão da literatura foi realizada utilizando as bases de dados: ACM Digital Libraries, IEEE Xplore, ScienceDirect e SpringerLink. Na seleção de trabalhos, foram utilizados os motores de pesquisa das bibliotecas digitais e nelas combinações de palavras referentes à tecnologia pesquisada, formando a seguinte *string* de busca: ("Augmented Reality"AND "Manufacturing") OR ("Augmented Reality"AND "Production") OR ("Augmented Reality"AND "Assembly") OR ("Augmented Reality"AND "Shop Floor") OR ("Augmented Reality"AND "Factory floor") OR ("Mixed Reality"AND "Manufacturing") OR ("Mixed Reality"AND "Production") OR ("Mixed Reality"AND "Assembly") OR ("Mixed Reality"AND "Shop Floor") OR ("Mixed Reality"AND "Factory floor"). A combinação das palavras utilizadas está apresentada na Tabela 2.1. Estas palavras foram aplicadas nos títulos, resumos e palavras-chave dos autores no momento da pesquisa.

A pesquisa foi limitada a artigos publicados em: jornais, revistas e conferências, no período de janeiro de 2012 a abril de 2018, e escritos em inglês. Após extração, foram removidos todos os artigos duplicados encontrados na utilização das diferentes palavras-chave, artigos não acadêmicos (literatura comercial, relatórios, posters), e artigos curtos (com menos de 5 páginas).

Em seguida, todos os resumos foram lidos para a seleção apenas de artigos de aplicação de RA em ambiente fabril e revisões da literatura pertinente ao assunto. Ao final foram extraídos

Tabela 2.1: Combinação das palavras de pesquisa

Palavra de busca 1	Palavra de busca 2
Augmented Reality	Manufacturing
Augmented Reality	Production
Augmented Reality	Assembly
Augmented Reality	Shop Floor
Augmented Reality	Factory Floor
Mixed Reality	Manufacturing
Mixed Reality	Production
Mixed Reality	Assembly
Mixed Reality	Shop Floor
Mixed Reality	Factory Floor

os dados dos artigos que apresentaram o objetivo da utilização e tiveram ao menos um protótipo da solução testado e avaliado por usuários.

2.3.2 Resultados

A busca das palavras-chave nas bases citadas no capítulo anterior foram responsáveis pela extração de 443 artigos, dos quais 138 estavam duplicados. Após leitura dos resumos, 74 foram classificados como aplicações ou revisão de literatura referente à aplicação de RA em ambiente de produção. Ao final 65 aplicações foram utilizadas para análise por possuírem ao menos um protótipo testado e avaliado. Somado a este número 9 revisões de literatura foram também incluídas nos dados devido a sua importância na justificativa de ganhos e dificuldade da utilização da tecnologia. A distribuição dos artigos selecionados ao longo dos anos ocorreu conforme a Figura 2.5.

As pesquisas ocorreram, em sua maioria, nos continentes europeu e asiático, conforme distribuição da Figura 2.6. Nenhum estudo foi encontrado nos continentes Sul Americano e Africano. Dentre os países que obtiveram maior número de publicações destaca-se Singapura, Itália e Alemanha com 10, 9 e 8 publicações respectivamente.

O maior percentual das aplicações não tiveram uma indústria alvo definida, totalizando 29 pesquisas. No entanto, dentro dos setores que foram declarados, a indústria automobilística e a de processos mecânicos foram as mais citadas com 13 e 7 publicações respectivamente. O percentual de pesquisas por segmento industrial está apresentado na Figura 2.7.

As aplicações em ambiente de produção foram classificadas em três macro objetivos: instruções de atividade, visualização de dados e simulação de montagens. A Figura 2.8 indica o percentual

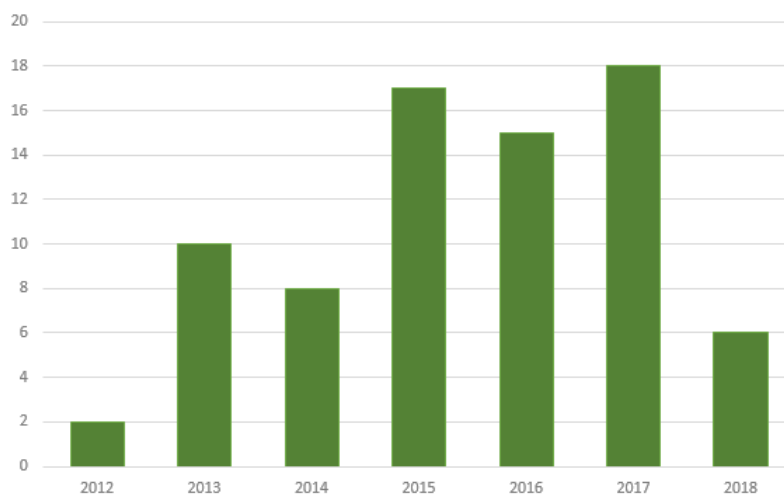


Figura 2.5: Publicações ao longo dos anos.

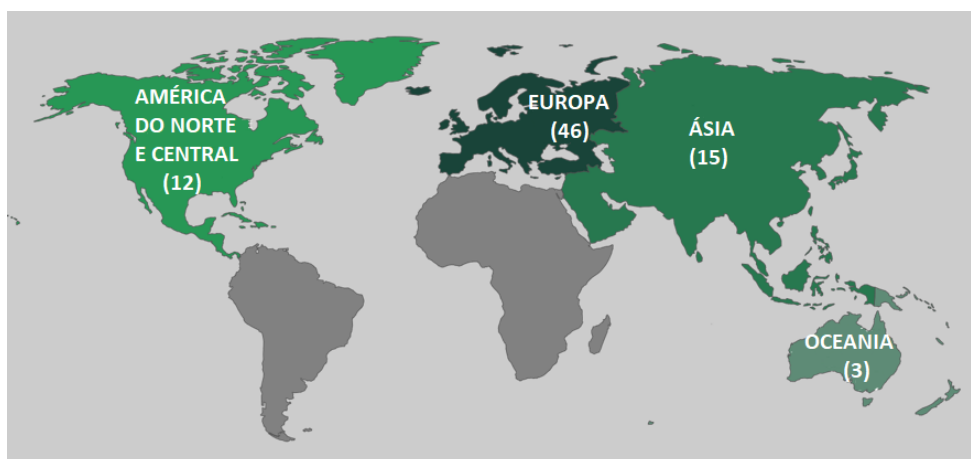


Figura 2.6: Publicações por continente.

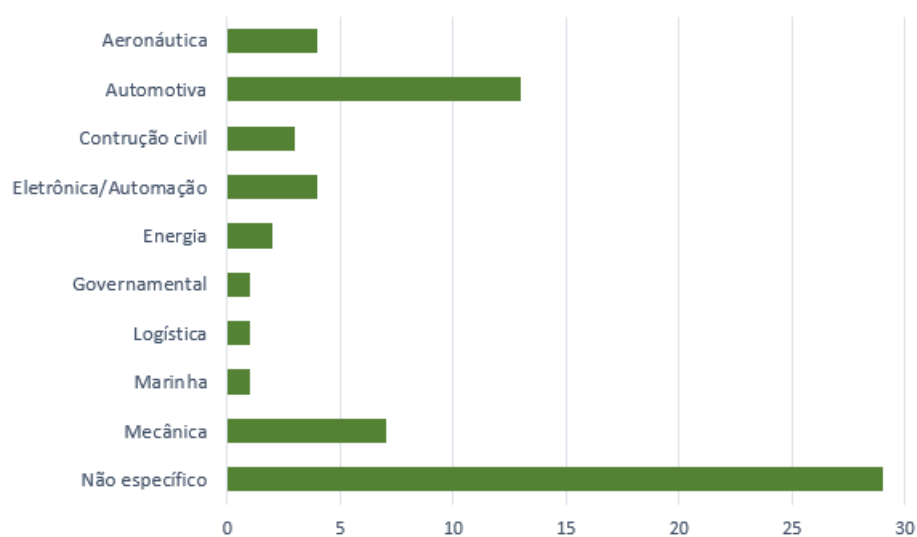


Figura 2.7: Aplicações por segmento da indústria.

de cada macro objetivo.

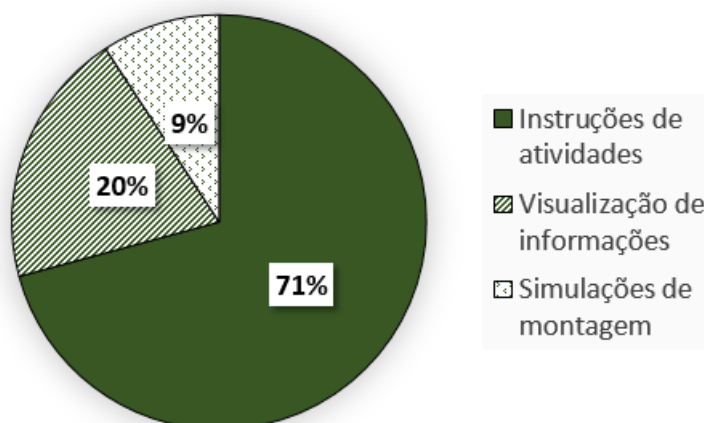


Figura 2.8: Objetivos das aplicações.

Instruções de atividades foram utilizadas majoritariamente para a montagem e desmontagem manual de componentes, manutenção de equipamentos e treinamento de operadores. Em um menor número, também foram identificadas aplicações para seleção de componentes, *setup* de máquinas, inspeção de qualidade e manual de instruções. As ta finalidade, toda a informação para a montagem estava armazenada em uma base de dados e o segundo contava com o suporte remoto de um usuário.

A visualização de dados em RA foi utilizada com a finalidade de se obter dados instantâneos de parâmetros de processos, indicadores de qualidade e de manutenção, análise de cronogramas de projeto e análises de riscos à saúde e ergonomia.

Por fim, as simulações de montagem foram utilizadas com a finalidade de verificar a segurança e eficiência de ambientes de trabalho nos quais existe a interação homem-robô, simular resultados de parâmetros de usinagem diretamente no material utilizado, e simular montagens manuais na própria área de trabalho.

Como ferramenta de projeção de objetos virtuais, foram encontrados na literatura aplicações utilizando dispositivos móveis (HMD - Head-Mounted Display, Tablet e *smartphone*) e fixos (projetor e monitor estático). A Figura 2.9 ilustra os dispositivos utilizados, sendo que quatro trabalhos Gašová, Gašo e Štefánik (2017), Wang et al. (2014), Makris et al. (2013), Gimeno et al. (2013)) avaliaram a aplicação utilizando múltiplas alternativas.

Em relação às formas de rastreamento, 63% foram aplicações onde marcadores foram utilizados. A Figura 2.10 indica os métodos e a quantidade de aplicações em que foram utilizados.

Levando-se em consideração apenas as aplicações que indicaram: setor industrial específico de aplicação, dispositivo de projeção e o método de rastreamento, foi possível fazer uma comparação

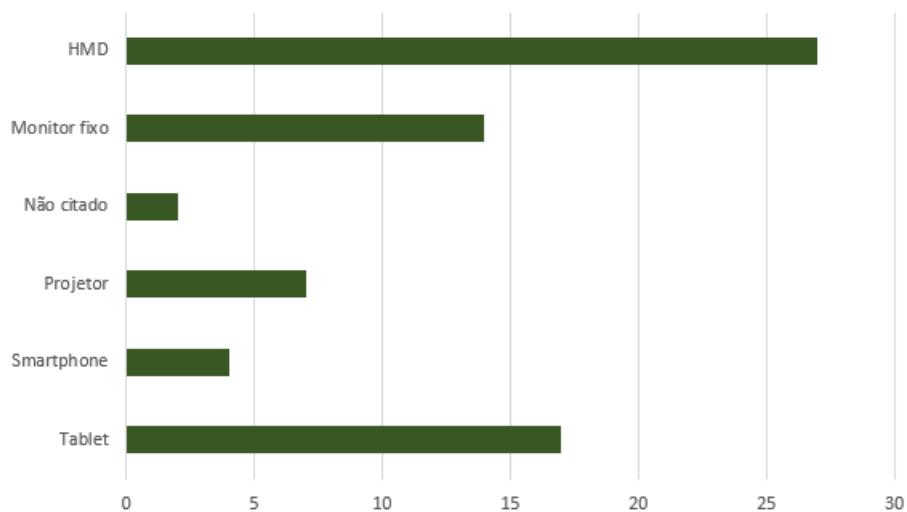


Figura 2.9: Dispositivos de projeção das aplicações.

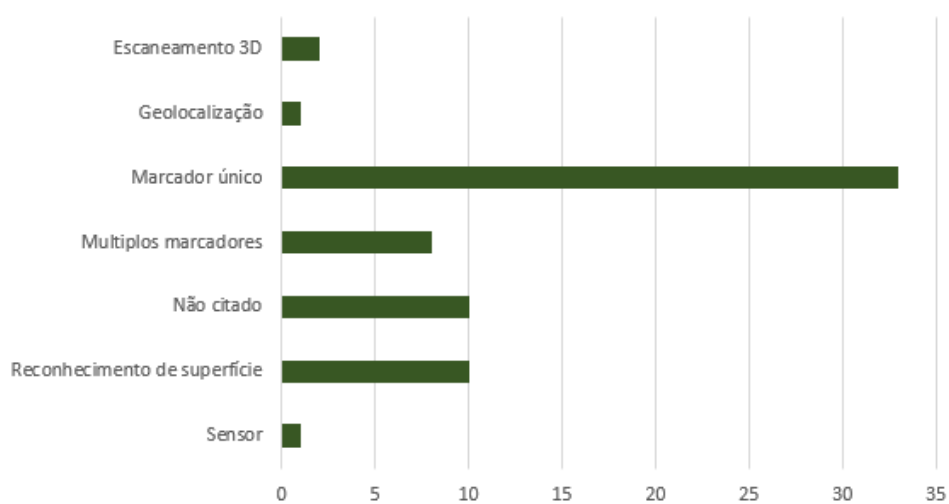


Figura 2.10: Métodos de rastreamento das aplicações.

entre as formas de reconhecimento conforme o dispositivo (Figura 2.11), do dispositivo utilizado conforme setor industrial (Figura 2.12) e o método de rastreamento em cada setor industrial (Figura 2.13). Esta análise possibilita identificar possíveis padrões de investimento na tecnologia e limitações da utilização de formas de rastreamento em determinados dispositivos ou setores industriais.

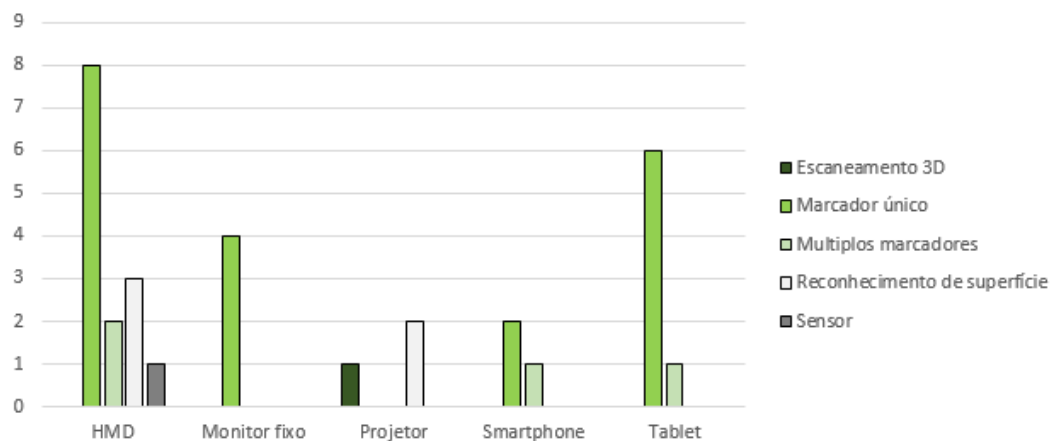


Figura 2.11: Métodos de rastreamento utilizado em cada dispositivo de projeção.

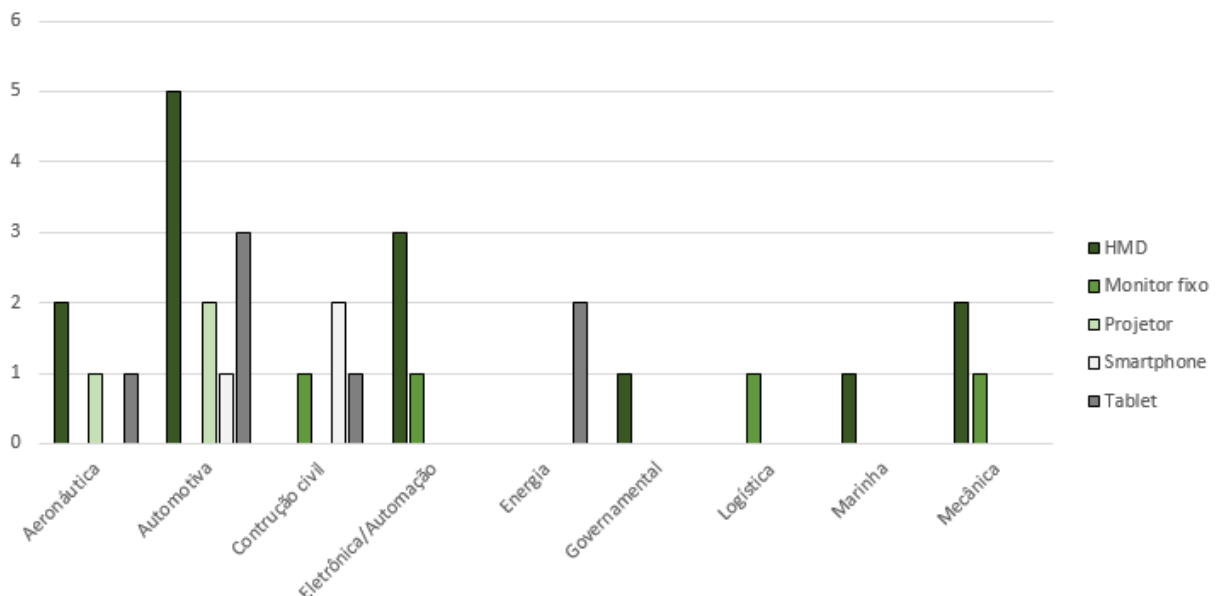


Figura 2.12: Dispositivo de projeção utilizado em cada setor industrial.

Apesar de apenas 6% das aplicações analisadas terem evoluído de um protótipo para uma solução de manufatura, 83% das aplicações apontaram ganhos pós implementação. A Figura 2.14 aponta todos os ganhos identificados pelos autores e a quantidade de vezes em que foram citados.

Em contra partida, 58% dos trabalhos analisados reportaram suas dificuldades de implementação e limitações de utilização. A Figura 2.15 lista todos os desafios relatados e a quantidade de vezes

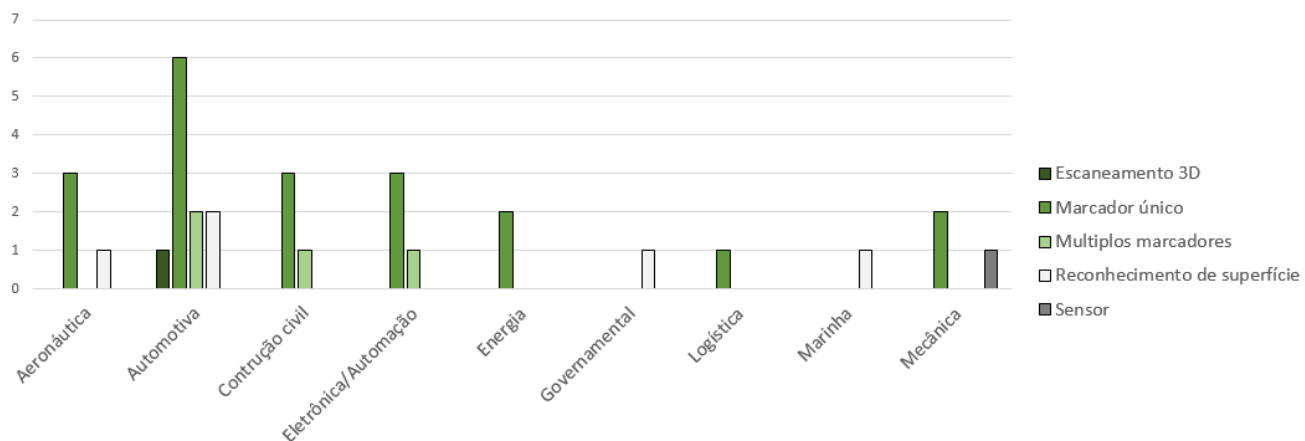


Figura 2.13: Métodos de rastreamento em cada setor industrial.

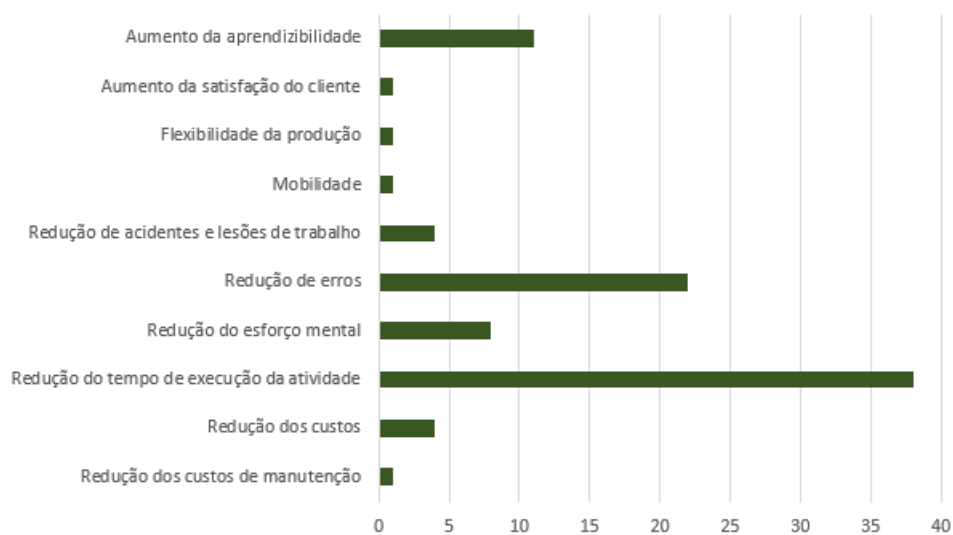


Figura 2.14: Benefícios da RA.

em que foram citados.

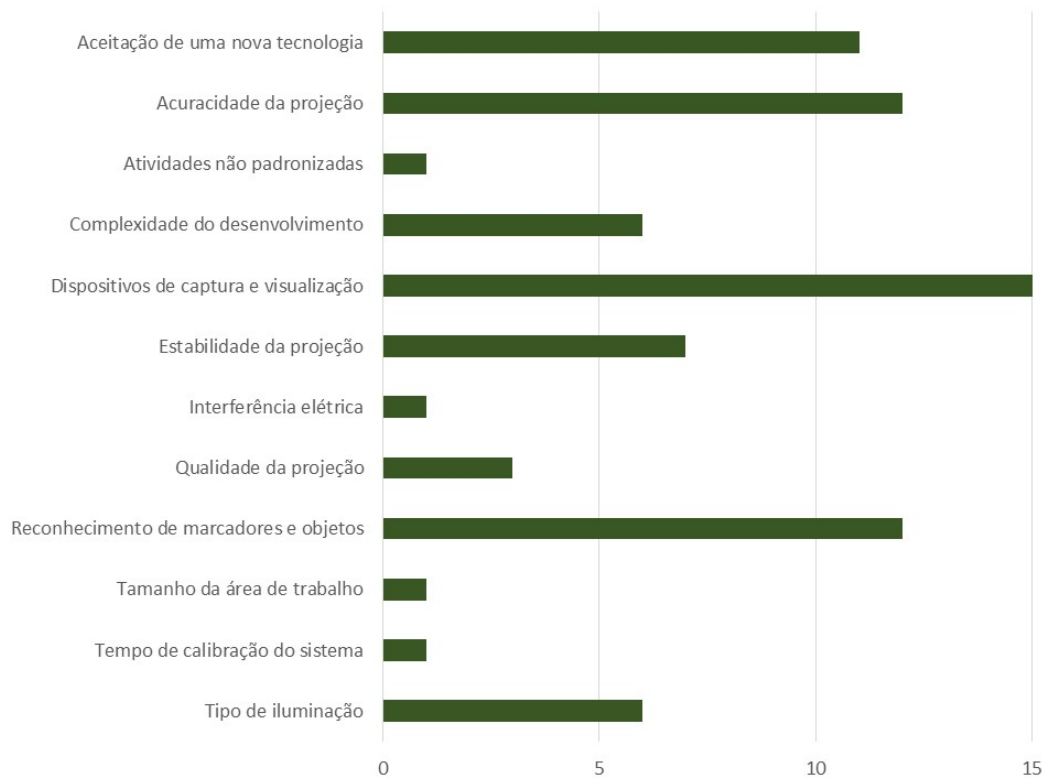


Figura 2.15: Desafios e limitações da RA.

2.3.3 Discussão dos resultados

As pesquisas em RA, direcionadas à resolução de problemas industriais, se concentraram majoritariamente nos continentes europeu, asiático (fortemente impulsionado por publicações chinesas) e norte-americano. Sugere-se desta forma que empresas que buscam esta tecnologia como inovação de processo possuam uma característica de investimento em inovação mais centralizada em suas sedes, visto que nenhuma publicação foi realizada em países cuja industrialização se dá por meio de filiais como: Brasil, África do Sul e Índia. Exceção a este fato encontra-se o México, cujo número de publicações representa 58% dos estudos realizados na América do Norte.

Em todas as localizações onde foram encontradas aplicações, o maior número de pesquisas foram realizadas sem que houvesse um segmento industrial específico. Apesar deste distanciamento entre pesquisas e aplicações reais, o número de publicações sobre o tema tem uma tendência de crescimento nos últimos anos. Esta relação provavelmente indica um interesse industrial na tecnologia, porém não para desenvolver soluções específicas para seus processos, mas sim pela busca de ferramentas prontas e maduras para aplicação.

Ao analisar os setores industriais que mais foram citados, foi possível notar que a utilização da RA não está diretamente ligada a produtos de alto valor agregado, como no caso da indústria aeronáutica ou marinha, mas sim a processos de alta complexidade com produtos de elevado consumo, como nos casos da indústria automotiva e mecânica. Quando se compara a finalidade das aplicações ao segmento industrial, também se pode constatar que a tecnologia está fortemente relacionada à segmentos com maior número de atividades manuais, sendo assim pouco utilizada na indústria de eletrônica e energia.

A dependência dos marcadores ainda é fator impactante para a aplicação de soluções de RA nos ambientes de produção (LIU; SEIPEL, 2017; ZHU; ONG; NEE, 2014; FANG; ONG; NEE, 2014; TZIMAS; VOSNIAKOS; MATSAS, 2018; WESTERFIELD; MITROVIC; BILLINGHURST, 2015). Conforme dados extratificados, esta prática, quando somadas as utilizações de marcadores únicos ou múltiplos, representa 66% das aplicações. Não se pôde encontrar qualquer relação que indicasse que marcadores são melhor aceitos em um dado setor industrial, pois em todos os setores que tiveram vários casos analisados sua utilização foi superior aos demais métodos.

A utilização de soluções sem marcadores, foi responsável por outro desafio identificado nesta revisão, a acuracidade da projeção. Tecnologias de reconhecimento de superfície ainda não são maduras o suficiente para os ambientes de produção (TAMAAZOUSTI et al., 2016).

Esta baixa maturidade exige um ambiente de trabalho com maior controle de iluminação e de composição de objetos para se obter resultados satisfatórios (GUREVICH; LANIR; COHEN, 2015). Mesmo em ambientes de teste, projeções tendem a ter uma menor acuracidade e resolução quando utilizados métodos onde o marcador não existe ou não está visível ao dispositivo (NOVAK-MARCINCIN et al., 2013; DANIELSSON et al., 2017; RODRIGUEZ et al., 2015).

Outro fator limitante identificado nas pesquisas diz respeito ao dispositivo de projeção utilizado. Dispositivos fixos (monitores estáticos e projetores) podem causar impactos ao processo produtivo dependendo de sua localização, pois estes limitam a movimentação e locomoção dos usuários (DOSHI et al., 2017). Todas as aplicações destes dispositivos foram realizadas em ambientes fechados de produção, por isso não aparecem em aplicações da construção civil ou energia. O uso de monitores fixos é atualmente a forma mais simples para a criação de ambientes de RA (BARNA et al., 2012), por esta razão o rastreamento por meio de marcadores únicos vem sendo a alternativa escolhida nas pesquisas.

Apesar do baixo custo de aquisição do equipamento, a utilização de dispositivos portáteis não vestíveis (Smartphones e Tablets) tem como grande desvantagem a necessidade que ao menos uma das mãos do usuário o esteja segurando, gerando impacto direto na atividade a ser executada (TATIĆ; TEŠIĆ, 2017; MICHALOS et al., 2016). Alguns ambientes de produção também podem não ser adequados a estes dispositivos, podendo danificá-los durante a utilização (CHALHOUB; AYER, 2018).

Por fim, dispositivos vestíveis, apresentam como grande vantagem a mobilidade do usuário. No entanto, seu uso prolongado gera desconforto devido ao peso além de causar a alguns usuários dores de cabeça, tontura e náusea (PINTZOS et al., 2014; LIU et al., 2017; NEE et al., 2012; HAO; HELO, 2017). A utilização destes dispositivos se destacou mais em aplicações do setor automotivo e de eletrônica, tal acontecimento pode ter sido motivado devido à característica dessas indústrias de possuírem processos rápidos de fabricação, uma vez que a maior parte dos dispositivos não necessita de constantes calibrações, visto que são dispositivos criados especificamente para RA e possuem sensores como giroscópio, magnetômetro e acelerômetro para auxiliar no rastreamento.

Um grande desafio dos dispositivos e aplicações é a criação de ambientes de interação mais naturais ao usuário. O uso de movimentos naturais que possam ser bem identificados pelo sistema proporcionaria uma maior aceitação da tecnologia e conforto durante a utilização (TZIMAS; VOSNIAKOS; MATSAS, 2018; WESTERFIELD; MITROVIC; BILLINGHURST, 2015).

Como fator atrativo mais destacado encontra-se a redução do tempo de execução da ati-

vidade. Este fator deve-se majoritariamente à redução de erros durante a operação industrial, apontado em 39% dos casos de redução do tempo de execução. Também possibilitam este ganho a redução do esforço mental do usuário durante a atividade (visto que as instruções são mais claras e intuitivas (WANG; ONG; NEE, 2016; MENDOZA et al., 2015)) e o aumento da aprendizibilidade, relatados em 13% e 8% dos casos, respectivamente. Pode-se também associar a este ganho o desenvolvimento de processos mais robustos realizados quando a RA é utilizada ainda na fase de concepção e permite que simulações *in situ* identifiquem dificuldades do processo (RE; OLIVER; BORDEGONI, 2016; NEE et al., 2012) ou situações de risco ao operador (BÜTTNER et al., 2017; MICHALOS et al., 2016; MAKRIS et al., 2016).

A redução de custos de operação por meio de eliminação de deslocamentos de especialistas (LAMBERTI et al., 2015; GUREVICH; LANIR; COHEN, 2015) e clientes (GUPTA et al., 2018) ou pela redução dos custos de não conformidade (WESTERFIELD; MITROVIC; BILLINGHURST, 2015; ONG; ZHU, 2013) também justificam o investimento em aplicações de RA.

2.3.4 Considerações finais

As aplicações de RA identificadas nesta revisão se caracterizam como inovações descontínuas, incrementais e imitativas. Caracteriza-se como descontínua todas as aplicações onde ocorreu uma interação remota entre o usuário do equipamento de projeção e o especialista ou cliente, pois nestes processos o deslocamento de um interlocutor foi eliminado, tornando o processo tradicional obsoleto.

Para as aplicações de instruções de atividades (com toda a informação já armazenada a uma base), visualização de informações e simulações de montagem cujo desenvolvimento foi realizado focado em um setor industrial, a inovação se caracteriza como incremental. Pois apesar dos benefícios identificados o processo tradicional não se torna obsoleto.

Por fim, todas as aplicações realizadas sem uma indústria específica, após implementação em um cenário real serão classificadas como imitativa. Esta forma de inovação são de interesse industrial pois não necessita de uma exposição do processo produtivo e possibilita um menor risco, já que a solução já foi previamente testada em contextos similares.

Com a análise dos setores industriais apresentada neste trabalho, conclui-se que as aplicações são utilizadas para instruções de atividades, visualização de informações de processos e simulações de montagens. Os desenvolvimentos não se limitam à manufatura de produtos de alto valor, mas sugere-se que seja aplicada em processos com alta complexidade ou riscos.

Os dispositivos mais utilizados nas aplicações identificadas, foram os vestíveis. Sua utilização é de interesse industrial pois não impacta na movimentação e deslocamento do usuário e do produto. Entretanto, nota-se uma carência de estudos sobre os aspectos de saúde ergonomia destes dispositivos para longas utilizações. Também não foi encontrado nenhum aspecto legal em relação ao seu uso.

Para superar as limitações de qualidade e acuracidade de projeções, uma possível solução, além do desenvolvimento de novos algoritmos de reconhecimento já citados na literatura, seria ampliar o conceito de *design for manufacturing*, que já é conhecido na indústria, para *design for augmentation*. Neste conceito, marcadores seriam parte integrada do produto ou do ambiente de trabalho.

Por fim, todos os ganhos da utilização da tecnologia encontrados na literatura foram financeiros, aumentando a produtividade ou reduzindo erros. Aspectos ambientais e de preservação do conhecimento poderiam ser mais explorados e discutidos, visto que algumas das utilizações reduziram retrabalhos e desperdícios.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto iniciou-se com uma revisão sistemática da literatura com o intuito de identificar alguma aplicação que imediatamente respondesse às questões de pesquisa. Nesta revisão foram encontradas diversas utilizações de RA na indústria, porém em nenhuma foi discutido o comportamento da projeção e sua tolerância de posicionamento. Desta forma o presente trabalho passou a desenvolver uma solução, utilizando como referência as aplicações identificadas na revisão sistemática, a fim de testar tal comportamento.

Neste trabalho, foi utilizado o ciclo de desenvolvimento para *design* de interação proposto por Preece, Sharp e Rogers (2002). A escolha deste ciclo deu-se especialmente devido à possibilidade de revisar os requisitos baseados no resultado das avaliações por inspeção. As fases do ciclo de desenvolvimento da solução deste trabalho estão apresentadas na Figura 3.1 e estão detalhadas nos subtópicos seguintes.

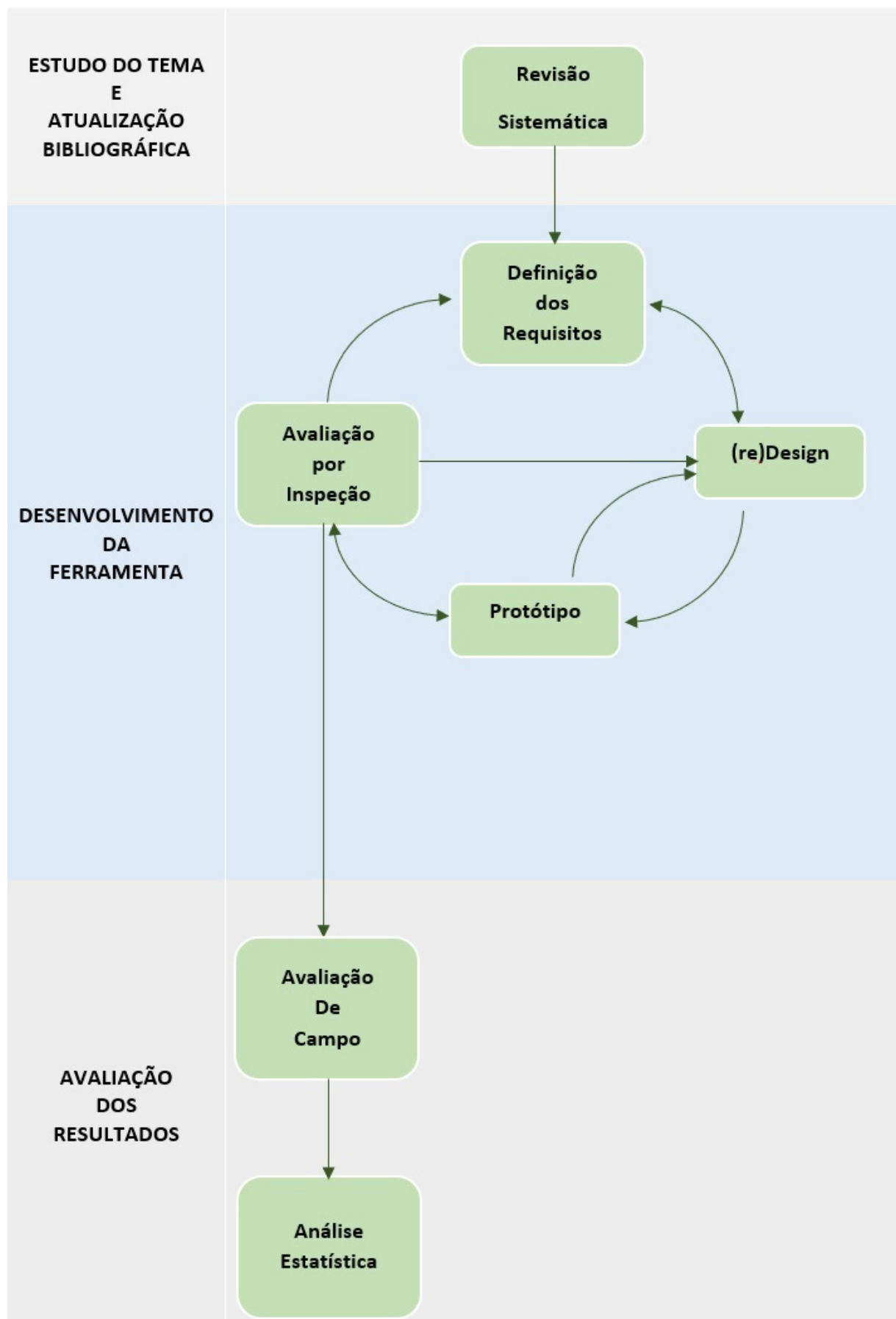


Figura 3.1: Ciclo de desenvolvimento da aplicação, adaptado de Preece, Sharp e Rogers (2002).

3.1 Definição dos requisitos

A definição dos requisitos funcionais do aplicativo foi desenvolvida baseada nas limitações da utilização de RA identificadas por Cardoso, Mariano e Zorzal (2019). Estes requisitos foram agrupados em dois grupos, referente ao dispositivo utilizado e à aplicação, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Requisitos funcionais da aplicação de RA

Grupo de concentração	Descrição do requisito
	- Permite que o usuário se movimente livremente pelo ambiente;
Dispositivo de visualização e processamento	<ul style="list-style-type: none"> - Peso máximo de 500g; - Resolução mínima do visor 1280x720 pixel; - Resolução mínima da câmera 1280x720 pixel - Possuir acelerômetro, giroscópio e magnetômetro; - Interação do usuário com o sistema possa ocorrer em ambientes com ruído.
Aplicativo	<ul style="list-style-type: none"> - Não utilizar marcadores para o rastreamento; - Adaptável à variação de luminosidade do ambiente; - Manter a mesma qualidade de imagem em ambientes com iluminância de 50lux a 750lux; - Não perder a referência inicial caso objeto saia do campo de visualização; - Assegurar uma calibração para uma área de 0,4m²; - Armazenamento no dispositivo.

Conforme identificado na revisão sistemática, a mobilidade e o desconforto do usuário foram citados como desafios para as aplicações de RA. Por este motivo, definiu-se por utilizar um dispositivo de até 500g que não seja fixo e uma solução sem marcadores que não perca a calibração caso a referência do sistema esteja oculta. Ainda considerando os desafios citados pela revisão sistemática, fez-se necessária definir como requisitos funcionais alguns pontos relacionados a qualidade da projeção em ambientes produtivos.

Por fim, as características de resolução da câmera e do visor, bem como os sensores listados como requisitos atendem as melhores práticas de dispositivos identificados por Cardoso, Mariano e Zorzal (2019).

Por tratar-se de uma solução protótipo para validação da utilização de RA para montagens de estruturas, os requisitos não funcionais considerados dizem respeito apenas ao produto, desconsiderando assim os requisitos não funcionais organizacionais e externos. Os requisitos foram classificados conforme propriedades propostas por Sommerville (2007) e definidos conforme os trabalhos correlatos de Suárez-Warden et al. (2015), Xu et al. (2017), Wang et al. (2018a) e Holm et al. (2017), bem como necessidades identificadas por Cardoso, Mariano e Zorzal (2019). A Tabela 3.2 apresenta os requisitos não funcionais.

Dentre os requisitos não funcionais da aplicação, limitou-se ao desenvolvimento de um

Tabela 3.2: Requisitos não funcionais da aplicação de RA

Propriedade	Descrição do requisito
Velocidade	- Resposta do estímulo do usuário inferior a 0,5s; - Cadência mínima da projeção 30 fps.
Tamanho do aplicativo	- Aplicação inferior a 50MB.
Facilidade de uso	- Necessidade máxima de 1 hora de treinamento para utilização; - Interação intuitiva para o usuário; - Instruções em português.
Robustez	- Tempo de calibração inferior a 2 min;
Portabilidade	- Sistema operacional Android e/ou Windows.

aplicativo de tamanho inferior a 50MB levando em consideração o tamanho médio do arquivo CatProduct.

3.2 Design

Para a modelagem 3D foi utilizado o Catia V5 R26. A ferramenta CAD (Computer Aided Design) da Dassault foi utilizada nesta fase pois é uma das ferramentas mais utilizadas na indústria (PERUZZINI et al., 2018). Para a concepção dos modelos, foram medidas as distâncias físicas da estrutura básica onde os testes foram realizados (Figura 3.2) e recriado um modelo virtual de perfis e cavernas. Sobre os perfis e cavernas suportes, comercialmente utilizados na aviação, foram modelados e distribuídos aleatoriamente, criando cinco configurações para os testes. Todos os modelos criados no CATIA foram salvos em formato CGR e importados para o 3DS MAX a fim de convertê-los para o formato FBX.

**Figura 3.2: Estrutura básica para realização dos testes.**

Após a conversão de formato dos modelos 3D, o desenvolvimento do protótipo foi realizado

utilizando Unity 2018.4.1f1 e o SDK (Software Development Kit) de RA ARCore v1.10.0. A escolha do Unity com ARCore surgiu após a realização da revisão da literatura, onde foi recomendado novos estudos do SDK a fim de avaliar as vantagens de sua implementação na indústria (BLANCO-NOVOA et al., 2018; FRAGA-LAMAS et al., 2018; BLANCO-PONS; CARRIÓN-RUIZ; LERMA, 2018; ZIMMER et al., 2017).

Para a validação do protótipo, foi escolhido o *smartphone* Samsung Galaxy S9+ com sistema operacional Android 9.0. O dispositivo escolhido pesa 189g possui câmera com resolução de 4032 x 3024 pixel e tela com resolução de 2960 x 1440 pixel, além dos seguintes sensores: Acelerômetro, Barômetro, Giroscópio, sensor Geo Magnético, sensor de Posicionamento, sensor de Pressão, sensor de Proximidade, sensor de luz RGB. As especificações do dispositivo atenderam aos requisitos funcionais propostos na fase de definição de requisitos.

Ainda foi utilizada uma estrutura de um segmento de um jato E-Jet da Embraer, produzida pela empresa Latecoere e disponível no laboratório da Fatec de São José dos Campos (Figura 3.3) e um tripé de 65cm de altura, adaptado para fixação do dispositivo móvel.



Figura 3.3: Segmento utilizado para realização dos testes.

3.3 Protótipo

Para testar cada modelo virtual da fuselagem foram criados cinco protótipos, cuja única diferença é o posicionamento dos suportes virtuais que devem ser marcados. O protótipo de maior tamanho ocupou 55Mb, atendendo assim ao requisito de realizar todo o armazenamento no dispositivo. Os protótipos desenvolvidos identificam as superfícies existentes no ambiente real para a projeção dos objetos virtuais. A utilização é composta de duas fases, calibração e projeção.

Na etapa de calibração o sistema pedirá ao usuário que mova o dispositivo para que sejam

identificados os planos existentes. Uma vez identificados os planos, a região de projeção se destaca com uma malha, conforme ilustrado na Figura 3.4.



Figura 3.4: Malha criada após identificação das superfícies reais.

Com a região coberta pela malha, o usuário deve selecionar uma referência para projetar o modelo virtual. No caso deste protótipo foi definido que o usuário deveria selecionar o terceiro rebite, contando da caverna da direita para a esquerda, do terceiro perfil abaixo das janelas, conforme Figura 3.5.



Figura 3.5: Local de referência para instanciar o modelo virtual.

Na etapa de projeção, após a seleção da referência na calibração, o objeto virtual é projetado sobre a estrutura real. Inicialmente, o usuário tem autonomia para rotacionar e transladar a projeção na horizontal e vertical, não sendo possível alterar a profundidade. Essa liberdade

permite que os usuários façam ajustes finos para garantir o melhor alinhamento das cavernas e perfis reais e virtuais.

Por tratar-se de um protótipo com modelos fictícios, nenhum registro de usuário foi desenvolvido para preservação dos modelos. Todas as interações do usuário com o sistema foram monitoradas pelos avaliadores durante os testes em campo.

3.4 Avaliação por inspeção

Com o protótipo criado, os testes de funcionalidade foram executados fora da estrutura da aeronave visando identificar problemas na interação do usuário com a solução desenvolvida. O método de avaliação por inspeção utilizado foi a avaliação heurística por permitir que os avaliadores, pudessem inspecionar sistemicamente a interface em busca de problemas de usabilidade (BARBOSA; SILVA, 2010).

Conforme Nielsen (1993) um conjunto inicial de 10 heurísticas podem descrever as características desejáveis de interação, são elas:

- Visibilidade do estado do sistema: o sistema deve sempre informar ao usuário o que está acontecendo por meio de uma resposta adequada e no tempo correto;
- Correspondência entre o sistema e o mundo real: o sistema deve utilizar palavras frases e conceitos familiares ao usuário fazendo com que a informação apareça em uma ordem natural e lógica;
- Controle e liberdade do usuário: a interface deve permitir que o usuário faça e refaça a atividade caso a tenha executada de forma incorreta;
- Consistência e padrão: os usuários não devem ter de se perguntar se palavras, situações ou ações diferentes significam a mesma coisa;
- Prevenção de erro: melhor que uma boa mensagem de erro é um desenvolvimento cuidadoso para evitar que os erros ocorram;
- Reconhecimento: as instruções de uso do sistema devem estar visíveis ou facilmente acessíveis sempre que necessário, não sendo necessário que o usuário memorize informações para manipulação;

- Flexibilidade e eficiência: aceleradores podem tornar a interação do usuário mais rápida e eficiente, permitindo que o sistema consiga servir igualmente bem os usuários experientes e inexperientes;
- Projeto estético e minimalista: a interface não deve conter informação que seja irrelevante ou raramente necessária;
- Ajudar os usuários a reconhecerem, diagnosticarem e se recuperarem de erros: as mensagens de erro devem ser expressas em linguagem simples, indicando precisamente o problema e sugerindo uma solução;
- Ajuda e documentação: a documentação de ajuda deve ser fácil de ser encontrada e focada no usuário, quando necessária.

Inicialmente, foram apresentadas as telas de interação até que as projeções fossem realizadas para cada usuário. Após apresentação do sistema, cada avaliador individualmente calibrou o sistema, e visualizou as projeções. Este ciclo de testes foi realizado por três avaliadores até que todos os modelos fossem visualizados. A ordem de seleção dos modelos foi aleatória para cada usuário e os testes foram conduzidos individualmente. Ao final dos testes, as seguintes perguntas foram feitas aos avaliadores:

- Em algum momento você não entendeu o que o sistema solicitava?
- Todas as instruções para utilizar o aplicativo estavam disponíveis?
- As instruções durante a operação estavam claras?
- Existia alguma palavra ou expressão no aplicativo que você não conhecia ou que te causou dúvida?
- Em algum momento você notou que o sistema te pedia a mesma ação de forma diferente?
- Quando você realizou alguma tarefa errada, foi possível corrigir?
- Ocorreu algum erro durante a utilização do aplicativo?
- Caso você tenha obtido algum erro, o aplicativo te descreveu o erro? Você conseguiu entender o que foi o erro?
- Você achou a utilização do aplicativo simples?

Durante as avaliações, os avaliadores reportaram os itens conforme as 10 heurísticas indicando a descrição da falha, o local onde ocorreu, a frequência, e se após a falha, o teste pôde ser continuado.

3.5 Avaliação de campo

Os dados utilizados neste estudo foram coletados utilizando a aplicação desenvolvida e uma estrutura semi-monocoque de uma aeronave, conforme descrito no tópico materiais utilizados.

Sobre os perfis e cavernas desta estrutura pequenos suportes metálicos, medindo cerca de 15mm, foram posicionados em uma área de 370mmx970mm (distância entre 2 cavernas e 7 perfis consecutivos na estrutura da aeronave utilizada). O posicionamento dos suportes respeitou a curvatura da estrutura, ficando exatamente sobre os perfis.

A avaliação de campo visou coletar informações sobre:

- A distância entre a projeção do aplicativo e a marcação real (conforme modelo CAD), chamado de variável *ERRO*:
- O tempo gasto para medir e posicionar cada grupo de suporte utilizando escala métrica e a aplicação de RA, denominada variável *TEMPO*:
- O tempo gasto para medir e posicionar todos os suportes utilizando os quatro modelos criados na fase de *design*, chamada de variável *MODELO*.

Para realizar os testes foram selecionadas cinco pessoas do sexo masculino com conhecimento em montagem de estruturas aeronáuticas. As principais características dos utilizadores estão apresentadas na Tabela 3.3.

Além dos cinco integrantes que realizaram os testes com RA, uma sexta pessoa (com idade de 29 anos, destro, técnico em manutenção de aeronaves, e com 7 anos de experiência em manutenção de aeronaves) realizou as mesmas montagens sem a utilização de RA. A escolha deste integrante deu-se por ele executar a atividade dos testes de forma manual em suas tarefas de trabalho.

3.5.1 Procedimento de avaliação de campo

Cada usuário participante dos testes de campo realizou a coleta das observações em dois dias. No primeiro dia, a estrutura física e os modelos virtuais lhes foram apresentados. Em

Tabela 3.3: Perfil dos usuários participantes dos testes de campo.

	Indivíduo				
	I	II	III	IV	V
Idade	29	30	29	26	27
Mão dominante	Direita	Direita	Direita	Direita	Esquerda
Formação	Engenheiro de produção	Tecnólogo em manutenção de aeronaves	Engenheiro de produção	Engenheiro mecânico	Tecnólogo em mecânica
Área de atuação	Indústria aeronáutica	Indústria aeronáutica	Indústria aeronáutica	Indústria aeronáutica	Indústria aeronáutica
Anos de experiência na área de atuação	6	8	5	8	3
Já havia utilizado RA anteriormente?	Sim	Não	Sim	Não	Não
Uso médio diário de touch screen	2h	3h	4h	6h	3h
Finalidade da utilização do touch screen	Comunicação Navegação web	Comunicação Navegação web	Comunicação Jogos Navegação web	Comunicação Jogos Navegação web	Comunicação Navegação web

seguida, cada pessoa dispôs de 30 minutos para manipular o aplicativo livremente, podendo efetuar calibração sem o auxílio do tripé e aproximar e afastar dos modelos virtuais após a projeção.

Todos os usuários seguiram a mesma sequência de testes, testando os modelos 1, 2, 3, 4 e 5 nesta sequência. Após a marcação de cada modelo o processo era reiniciado e os usuários necessitavam realizar nova calibração antes de iniciar o modelo seguinte. Foram realizadas quatro repetições de cada modelo por dia de teste. Tal medida foi essencial para minimizar o desgaste dos usuários durante a realização da atividade. Após realizar quatro repetições, os usuários foram submetidos novamente aos testes minimamente após uma semana.

Para evitar variações durante a fase de calibração, um padrão foi adotado para todos os usuários.

Inicialmente, o dispositivo é fixado em um tripé cuja altura da base é de 65cm. Esta fixação mantém o *smartphone* em um plano perpendicular ao solo e com a lente da câmera a uma altura de cerca de 70cm.

O tripé é posicionado a uma distância de cerca de 1m da região de trabalho, utilizando como referência o trilho central da estrutura. Um de seus pés de apoio deve encostar no trilho conforme Figura 3.6. A posição do tripé deve estar entre as duas cavernas centrais a fim de evitar distorções.

Em seguida o usuário afasta o tripé cerca de 15cm da região inicial de calibração, sem alterar sua referência entre as cavernas, deixando dois de seus pés logo atrás do trilho central da



Figura 3.6: Posição inicial de calibração.

estrutura, conforme evidenciado na Figura 3.7.



Figura 3.7: Posição final de calibração.

Na segunda posição do tripé, o usuário seleciona o ponto de referência e realiza os ajustes que julgar necessário de forma a manter as cavernas e perfis virtuais e reais alinhados.

Após o ajuste do modelo, o usuário tinha a possibilidade de soltar o dispositivo móvel ou apenas levantar o tripé para se mover livremente e realizar as marcações sobre os perfis, utilizando caneta esferográfica.

A fim de proteger a estrutura, toda a região de trabalho foi protegida com fita adesiva para que as marcas não fossem realizadas diretamente na pintura. A Figura 3.8 mostra a marcação sobre a fita realizada durante um dos ensaios.

Ao final das marcações os avaliadores mediam a distância entre a marcação e uma referência da própria estrutura utilizando uma escala métrica de 30 cm. Todas as medições foram realizadas com as mesmas referências e utilizando a mesma escala.

Para eliminar variações de luminosidade no ambiente de testes, as condições de uma monta-



Figura 3.8: Marcações realizadas durante avaliação de campo.

gem real foram simuladas. Todos os testes foram realizados em ambiente fechado sob iluminação artificial por lâmpadas fluorescentes instaladas nas extremidades da fuselagem e direcionadas para o piso.

3.6 Análise estatística

3.6.1 Conjunto de dados

O conjunto de dados utilizados neste estudo foram obtidos durante os testes de avaliação realizados em campo. A amostra para avaliação das variáveis *ERRO*, *TEMPO* e *MODELO* foram obtidas pelos usuários selecionados conforme tabela 3.3. A escolha de cinco pessoas para realizar as medições, pelo uso do aplicativo com RA, foi pensada para mitigar um possível viés do observador, que pode ocorrer quando há diferenças sistemáticas na coleta de dados conferidas ao observador.

Cada um destes cinco usuários marcou todos os suportes existentes nos modelos virtuais, totalizando um total de 1560 suportes. Além disso, para cada usuário, foram consideradas 8 repetições para cada modelo, totalizando um total de 40 observações.

Foram consideradas para análise da variável *TEMPO*, o tempo total gasto por modelo, para cada usuário e por repetição; assim como o tempo gasto somente na calibração e, também, o tempo gasto somente com as marcações do mesmo. Assim, para análise do tempo (Tempo total, de calibração ou marcação) foram consideradas 200 observações de *TEMPO* relativas ao uso de RA.

Já a variável ERRO foi calculada pela diferença entre o valor nominal do modelo (valor obtido pela medição no modelo CAD) e o valor medido pelo usuário.

Para o grupo controle, foi selecionada uma outra pessoa que ficou responsável pela coleta de 25 observações pelo método tradicional (utilizando escala métrica), as quais foram tomadas como referencial para verificar se as medidas obtidas por RA eram equivalentes às referências. Estas 25 observações consistiram em 5 repetições dos 5 modelos de marcadores propostos.

3.6.2 Testes estatísticos

A análise das variáveis coletadas foi feita, inicialmente, por meio de métodos estatísticos descritivos. Foram obtidas medidas descritivas (média, desvio padrão, coeficiente de variação - CV) e analisados os comportamentos das variáveis. Estas medidas foram apresentadas em tabela e a distribuição das variáveis em gráficos.

Considerando os dados obtidos pelo uso de RA, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis com o intuito de verificar igualdade entre os tratamentos (Indivíduos ou Modelos), para as variáveis Tempo total, Tempo de Calibração, Tempo de Marcação e Erro. O teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis foi escolhido, após averiguadas as hipóteses de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homocedasticidade (Teste de Levene) para as variáveis. Além disso, para as variáveis Tempo Total e Erro, foi aplicado o teste de Dunn (DUNN, 1964), para analisar quais tratamentos possuíram comportamentos distintos entre si.

Para efeito de comparação entre o uso de RA e o método tradicional, quanto ao TEMPO total de medições, foi utilizado o teste não-paramétrico U de Mann-Whitney. Também foi realizada a investigação do efeito da interação Modelo x Indivíduo sobre as medidas de TEMPO TOTAL e ERROS, ocasionando uma verificação minuciosa do efeito do Indivíduo sobre o TEMPO TOTAL dentro de cada Modelo de marcação proposto.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software estatístico R, versão 3.5.3 (The R Development Core Team, 2019). O nível de confiança estabelecido para todas as análises foi de 95% ($\alpha = 0,05$). Maiores detalhes sobre os testes utilizados podem ser encontradas em (SIEGEL, 2006), (AGRESTI, 2007) e (TRIOLA, 2008).

Capítulo 4

DESENVOLVIMENTO

4.1 Desenvolvimento dos modelos

Os modelos criados apresentam quantidades e distribuição diferente dos suportes, destacados por um círculo nas figuras. O primeiro modelo da fuselagem (Figura 4.1) possui 6 suportes, estando todos eles entre as duas cavernas centrais e distantes no mesmo perfil.

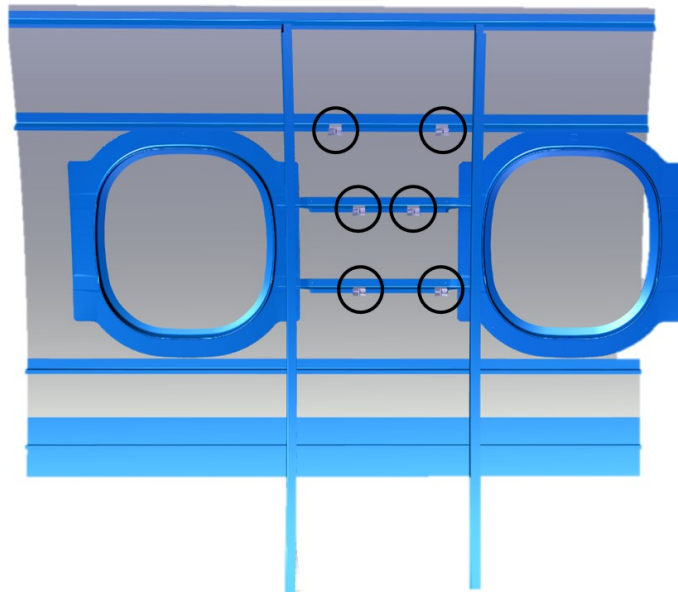


Figura 4.1: Modelo 1 - 3D utilizado nos testes.

O segundo modelo (Figura 4.2) possui 5 suportes também localizados entre as duas cavernas centrais. Diferentemente do primeiro modelo, este aproxima os suportes os deixando quase em contato um com o outro.

O terceiro modelo (Figura 4.3) possui 7 suportes. Diferentemente dos dois anteriores este distribui os suportes entre todos os perfis da região de análise, porém ainda os deixando entre as duas cavernas centrais. Neste modelo ainda, um suporte é posicionado próximo a uma das cavernas para avaliar se a projeção colidiaria com a própria caverna.

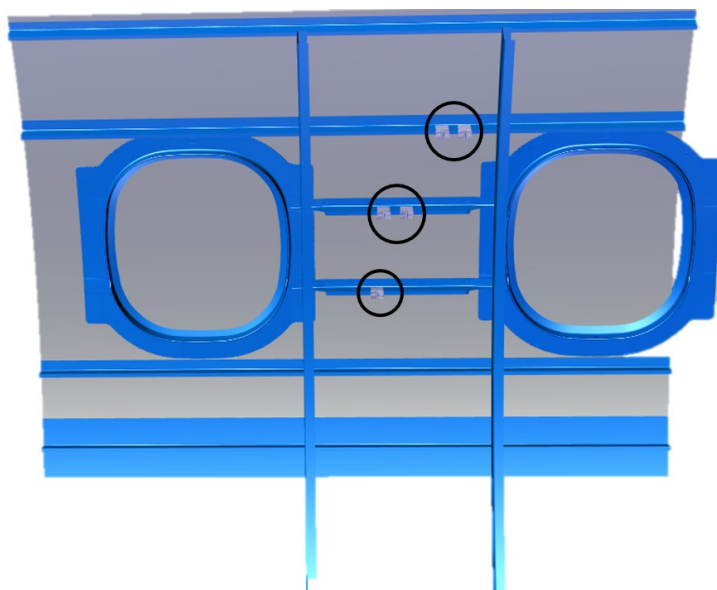


Figura 4.2: Modelo 2 - 3D utilizado nos testes.

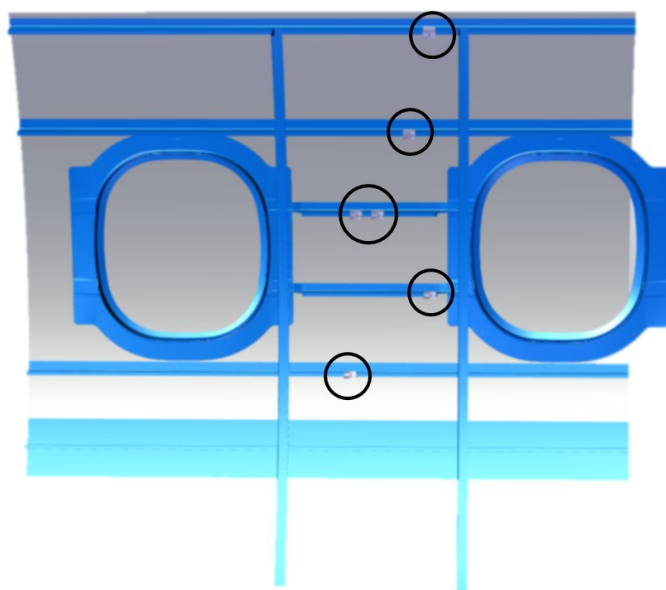


Figura 4.3: Modelo 3 - 3D utilizado nos testes.

O quarto modelo (Figura 4.4) possui 8 suportes e possui as mesmas características do terceiro modelo, testando agora a proximidade com a outra caverna central.

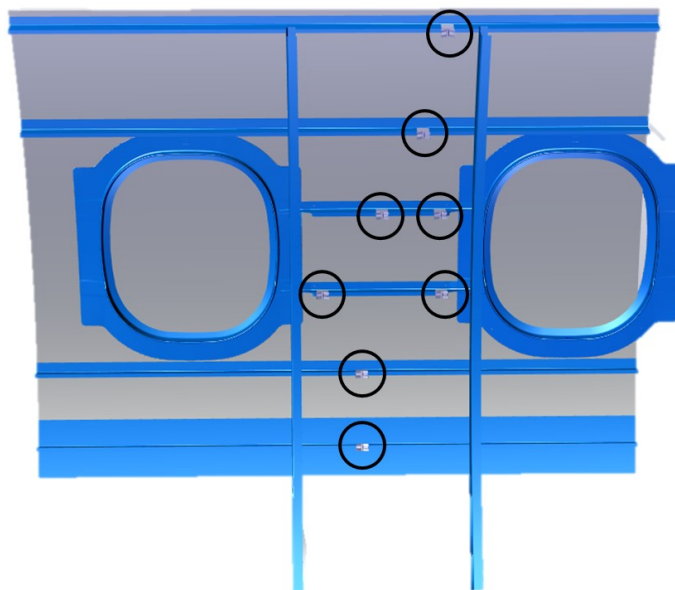


Figura 4.4: Modelo 4 - 3D utilizado nos testes.

O quinto modelo (Figura 4.5) possui 13 suportes. Os suportes foram alocados também nas regiões externas às cavernas, com o objetivo de avaliar o comportamento das projeções nas regiões de limite da área de estudo.

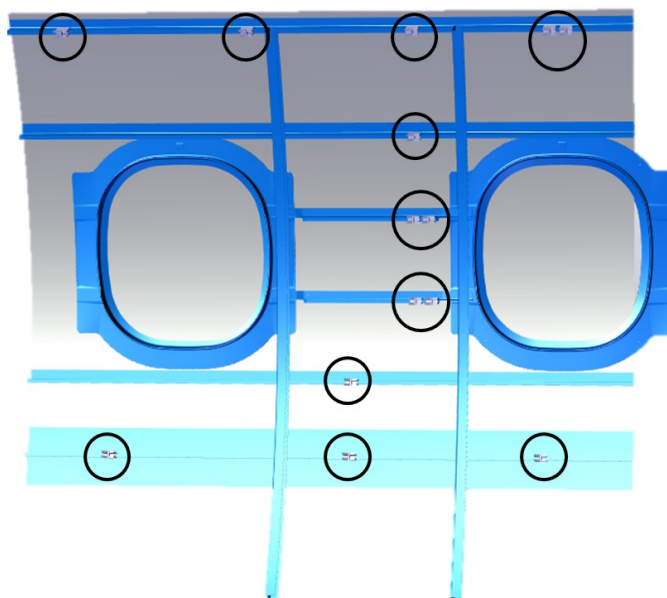


Figura 4.5: Modelo 5 - 3D utilizado nos testes.

Por fim a opacidade da estrutura básica dos modelos foi reduzida, pois durante as avaliações por inspeção notou-se que a alta opacidade da estrutura gerava dificuldade de localização do usuário no espaço. Todos os suportes seguiram com sua opacidade original.

4.2 Desenvolvimento do aplicativo

Os modelos importados para o Unity recebem a nomenclatura de *GameObject*. Esses objetos não podem fazer nada por conta própria, sendo necessário aplicar propriedades a eles antes de se tornarem parte do ambiente (Unity Technologies, 2019).

Para configurar e armazenar cada *GameObject* foram criados *Prefabs*. O recurso *Prefab* atua como um modelo a partir do qual se pode criar novas instâncias do *Prefab* em um cenário (Unity Technologies, 2019).

Com os modelos importados, o primeiro passo foi reduzir em 50% a opacidade da estrutura de referência (revestimento, perfis e cavernas), de forma que o usuário pudesse visualizar tanto a estrutura virtual quanto a real, deixando opacos apenas os suportes que não existiam no cenário real. Esta redução foi feita por meio de um material com modo de renderização transparente e suavidade de 0,5. O material foi associado aos componentes da estrutura básica utilizando o remapeamento de materiais do Unity dentro do próprio modelo importado.

Em seguida, foi construído um *Prefab* para cada modelo e agregado o componente *Box Collider*. Este componente permite a interação do objeto virtual com o usuário durante a execução do aplicativo quando realizado algum toque sobre a região definida. Ainda neste *Prefab* foi definida a posição dos eixos em relação ao modelo, de forma que a coordenada (0,0,0) ficasse exatamente no rebite definido como referência, destacado na metodologia, conforme ilustra a Figura 4.6.

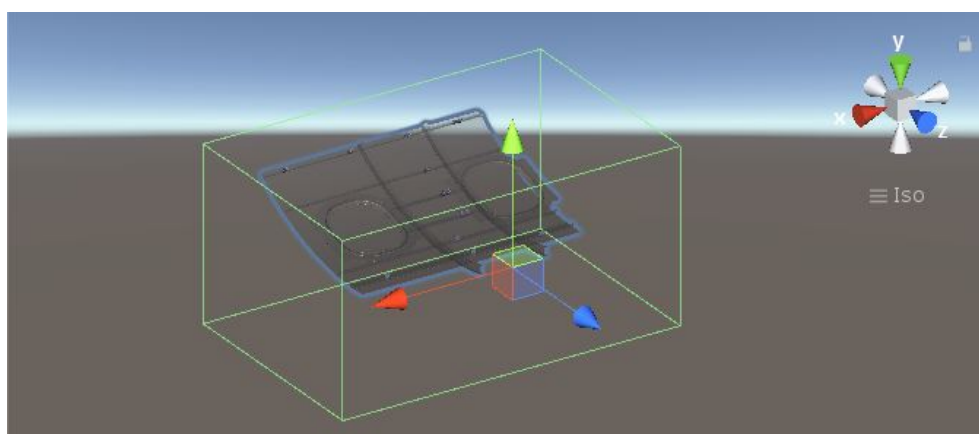


Figura 4.6: Referência de posicionamento dos modelos.

O aplicativo utilizou como base a cena do exemplo *ObjectManipulation* disponível no SDK do ARCore V1.10.0. O exemplo escolhido como referência possibilita a criação de soluções de RA sem marcadores e com projeções adaptáveis à variação luminosa. A estrutura de objetos criada para processar a solução de RA desenvolvida neste trabalho está apresentada na Figura

4.7.

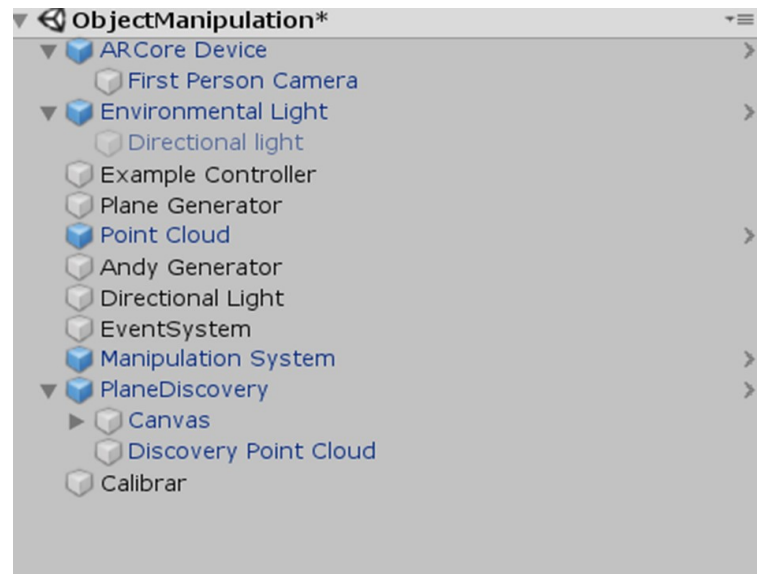


Figura 4.7: Estrutura de objetos do aplicativo.

Alguns *Prefabs* existentes no exemplo importado não foram alterados, pois atendiam aos requisitos do desenvolvimento proposto. Esses itens e suas funções estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: *Prefabs* utilizados sem alteração

<i>Prefab</i>	Função
Point Cloud	visualização dos pontos de interesse do mapeamento espacial, mostrando uma animação quando eles são identificados.
Plane Generator	unir os pontos identificados e criar planos, assim como, gerenciar a visualização de cada plano.
Environmental Light	ajustar automaticamente as configurações de iluminação da cena.
Manipulation System	manipulação do <i>GameObject</i> . Além de transladar e rotacionar o objeto este <i>Prefab</i> permite a elevação conforme posição do plano de projeção.

O Primeiro *Prefab* alterado dentro da cena foi o Andy Generator, cuja função consiste em gerar o objeto virtual sobre os planos identificados. Este *Prefab* utiliza o *script* *AndyPlacementManipulator* e possui as variáveis públicas destacadas na Figura 4.8. Onde destacam-se as variáveis: *Modelo*, que importa o *Prefab* do modelo 3D criado, e *Current Number Of Game Objects*, que é necessária para garantir que apenas um objeto seja incluído na cena.

O *script* associado a este *Prefab* verifica se houve algum toque na tela. Caso exista, ele verifica se o toque foi feito sobre algum plano criado, passando a seguinte etapa somente quando

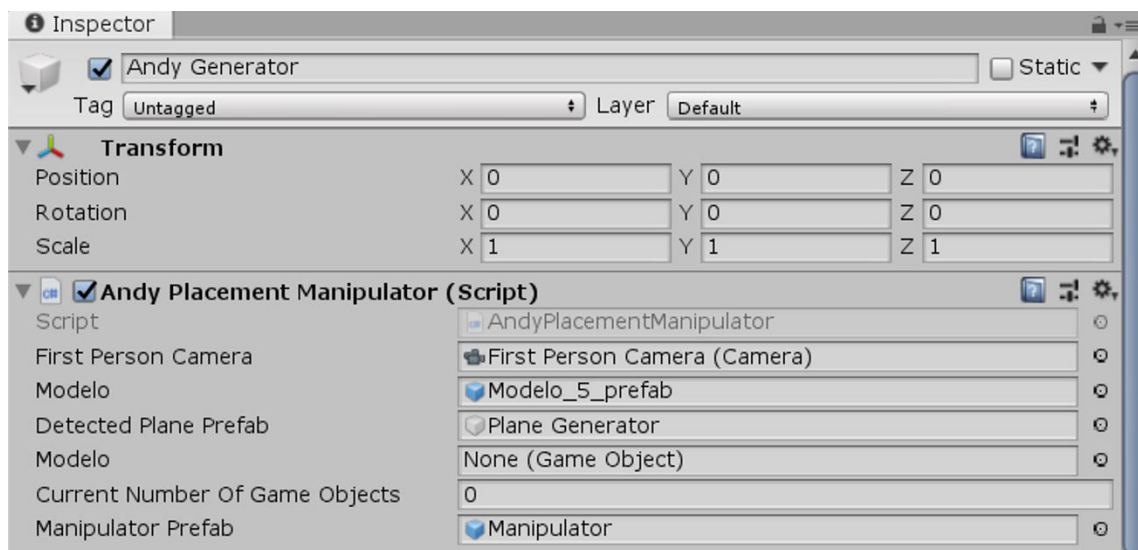


Figura 4.8: Código de posicionamento do modelo virtual.

o plano for tocado.

Ao identificar um toque sobre um plano criado, o *script* desabilita o reconhecimento de planos e oculta todos os planos que estavam visíveis ao usuário, não permitindo que mais objetos sejam incluídos no cenário, conforme extrato do código apresentado na Figura 4.9, linhas 103 e 109.

```

90     TrackableHitFlags raycastFilter = TrackableHitFlags.PlaneWithinPolygon;
91
92     if (Frame.Raycast(
93         gesture.StartPosition.x, gesture.StartPosition.y, raycastFilter, out hit))
94     {
95         if ((hit.Trackable is DetectedPlane) &&
96             Vector3.Dot(FirstPersonCamera.transform.position - hit.Pose.position,
97                 hit.Pose.rotation * Vector3.up) < 0)
98         {
99             Debug.Log("Hit at back of the current DetectedPlane");
100         }
101         else
102         {
103             if (CurrentNumberOfGameObjects<1)
104             {
105                 // Instantiate Andy model at the hit pose.
106                 modelo = Instantiate(Modelo, hit.Pose.position, hit.Pose.rotation);
107                 modelo.transform.Rotate(0, 0, 0, Space.Self);
108                 CurrentNumberOfGameObjects = CurrentNumberOfGameObjects+1;
109                 DetectedPlanePrefab.SetActive(false);
110                 var manipulator =
111                     Instantiate(ManipulatorPrefab, hit.Pose.position, hit.Pose.rotation);
112                 modelo.transform.parent = manipulator.transform;
113                 var anchor = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
114                 manipulator.transform.parent = anchor.transform;
115                 manipulator.GetComponent<Manipulator>().Select();

```

Figura 4.9: Código de posicionamento do modelo virtual.

Com a identificação do ponto de referência pela interação do usuário, o primeiro ponto de ancoragem é instanciado no ponto onde o usuário selecionou e o *Prefab Manipulation System* instanciado como filho do deste ponto de ancoragem. Por fim, o *GameObject* com o modelo

CAD é instanciado como filho do *Prefab Manipulation System*. A hierarquia dos componentes é ilustrada na Figura 4.10.

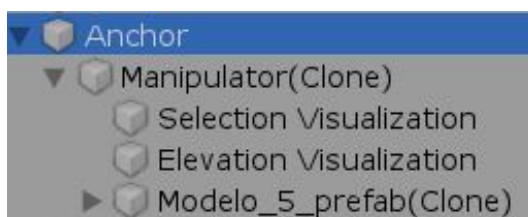


Figura 4.10: Estrutura do ponto de ancoragem referência.

Para garantir uma maior estabilidade do modelo, o *script* de controle ainda instancia outros 15 pontos de ancoragem em coordenadas pré estabelecidas no plano, tomando como referência o ponto selecionado pelo usuário. Estes pontos de ancoragem estão representados na Figura 4.11 e o respectivo código referente à localização na Figura 4.12.

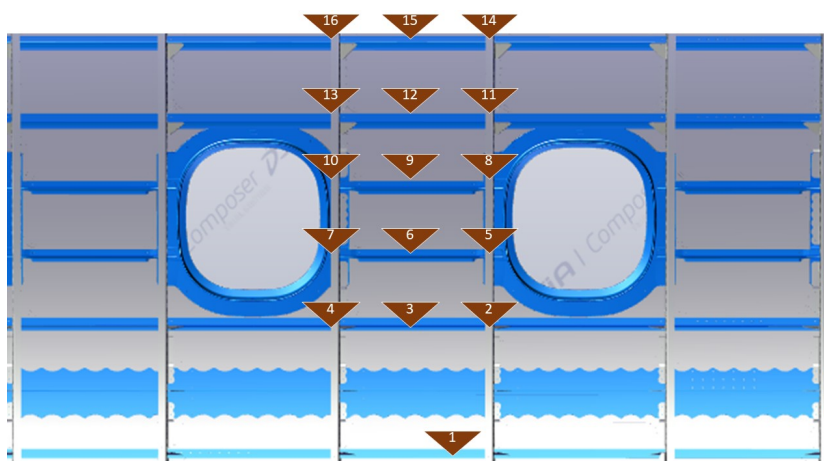


Figura 4.11: Localização dos pontos adicionais de ancoragem.

A utilização desses pontos adicionais foi uma solução adotada pós avaliação por inspeção. Pois nos primeiros testes quando os avaliadores se aproximavam dos suportes distantes do ponto de ancoragem principal, o sistema deslocava a projeção e não a retornava a posição de calibração, não cumprindo assim ao requisito de não perder a referência caso o objeto saia do campo de visão.

Para aprimorar a experiência do usuário, e evitar que o mesmo manipulasse o objeto virtual acidentalmente durante a marcação dos pontos. Foi adicionado um botão com a legenda "CALIBRAR" no canto direito inferior da tela. Ao selecionar este botão o usuário desabilita as funções do *Prefab Manipulation System*, interrompendo a manipulação do objeto até o fim dos testes. Para realizar este comportamento, foi criado um *Prefab* chamado de Calibrar, que não possui nenhum componente. O botão e o *Prefab Calibrar* foram associados de forma que quando o botão é selecionado, o *Prefab Calibrar* é desativado da estrutura de objetos.


```
117 Anchor anchor2 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
118 anchor2.transform.Translate(0.1f, 0f, 0.8f);
119 Anchor anchor3 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
120 anchor3.transform.Translate(0f, 0f, 0.8f);
121 Anchor anchor4 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
122 anchor4.transform.Translate(-0.2f, 0f, 0.8f);
123
124 Anchor anchor5 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
125 anchor5.transform.Translate(0.1f, 0f, 0.6f);
126 Anchor anchor6 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
127 anchor6.transform.Translate(0f, 0f, 0.6f);
128 Anchor anchor7 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
129 anchor7.transform.Translate(-0.2f, 0f, 0.6f);
130
131 Anchor anchor8 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
132 anchor8.transform.Translate(0.1f, 0f, 0.48f);
133 Anchor anchor9 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
134 anchor9.transform.Translate(0f, 0f, 0.48f);
135 Anchor anchor10 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
136 anchor10.transform.Translate(-0.2f, 0f, 0.48f);
137
138 Anchor anchor11 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
139 anchor11.transform.Translate(0.1f, 0f, 1f);
140 Anchor anchor12 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
141 anchor12.transform.Translate(0f, 0f, 1f);
142 Anchor anchor13 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
143 anchor13.transform.Translate(-0.2f, 0f, 1f);
144
145 Anchor anchor14 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
146 anchor14.transform.Translate(0.1f, 0f, 0.3f);
147 Anchor anchor15 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
148 anchor15.transform.Translate(0f, 0f, 0.3f);
149 Anchor anchor16 = hit.Trackable.CreateAnchor(hit.Pose);
150 anchor16.transform.Translate(-0.2f, 0f, 0.3f);
```

Figura 4.12: Parte do código para localização dos pontos adicionais de ancoragem.

Para controlar a aplicação e incluir a funcionalidade que impede a movimentação do modelo, o *Prefab* Example Controller foi editado incluindo as variáveis públicas AR Object, que faz referência ao *Prefabs* Andy Generator; Calibrar, que referencia o *Prefab* de mesmo nome; e AR Object 2 que é responsável por chamar novamente o *Prefab* do modelo. A Figura 4.13 ilustra os componentes do *Prefab Example Controller*.

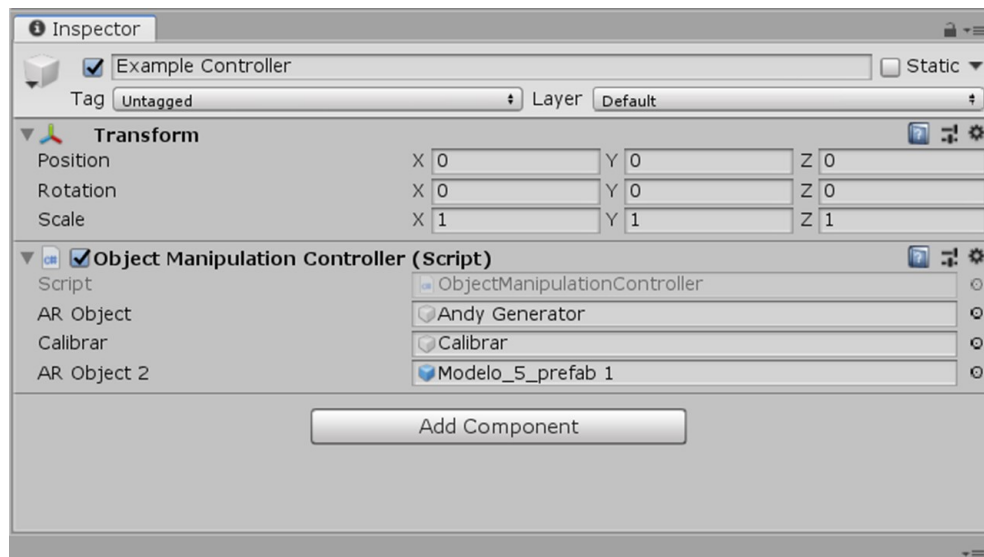


Figura 4.13: Componentes do *Prefab* Example Controller.

O *script* ObjectManipulationController analisa se o *Prefab* Calibrar está ativo ou inativo na cena utilizando a função UpdateApplicationLifecycle. Quando inativo, ele instancia o modelo (sem o *Prefab* Manipulator) com a mesma instanciação do modelo em que o usuário ajustou e desabilita o modelo ajustado. Assim não permite que o usuário altere a posição pós calibração. Esta funcionalidade é válida apenas quando o usuário já incluiu um modelo ao cenário. A parte do código responsável por esta ação é apresentado na Figura 4.14.

```

59     private void _UpdateApplicationLifecycle()
60     {
61         if (Calibrar.activeInHierarchy == false)
62         {
63             if (ARObject.GetComponent<AndyPlacementManipulator>().CurrentNumberOfGameObjects == 1)
64             {
65                 ARObject2 = Instantiate(ARObject2);
66                 ARObject2.transform.position = ARObject.GetComponent<AndyPlacementManipulator>().modelo.transform.position;
67                 ARObject2.transform.rotation = ARObject.GetComponent<AndyPlacementManipulator>().modelo.transform.rotation;
68                 ARObject2.transform.localScale = ARObject.GetComponent<AndyPlacementManipulator>().modelo.transform.localScale;
69                 ARObject.GetComponent<AndyPlacementManipulator>().modelo.SetActive(false);
70                 ARObject.GetComponent<AndyPlacementManipulator>().CurrentNumberOfGameObjects = 2;
71             }
72         }
73
74         // Exit the app when the 'back' button is pressed.
75         if (Input.GetKey(KeyCode.Escape))
76         {
77             Application.Quit();
78         }
79     }

```

Figura 4.14: *script* ObjectManipulationController.

4.3 Correções das avaliações por inspeção

O primeiro problema identificado na avaliação por inspeção foi a dificuldade em sobrepor o objeto virtual ao real. Inicialmente, o modelo era totalmente opaco e os usuários tinham dificuldade em saber se o modelo estava corretamente posicionado, conforme Figura 4.15.



Figura 4.15: Modelo opaco durante calibração.

O ajuste da opacidade até o ponto considerado satisfatório pelos usuários foi realizado em três ciclos, reduzindo a cada interação em 25%. O valor considerado ideal foi de 50%, pois abaixo deste ficava difícil identificar as linhas dos perfis e cavernas.

Outra dificuldade reportada durante a avaliação por inspeção foi a manipulação do objeto. Nos primeiros testes a movimentação do modelo ocorria quando o usuário o selecionava na tela do dispositivo. No entanto, durante a calibração e aproximação dos suportes alguns toques involuntários na tela aconteciam e com isso o objeto se deslocava. Também foi comum que ao tentar rotacionar o modelo os usuários alterassem a escala do objeto virtual. Para solucionar estes problemas foi incluído um círculo de referência na parte inferior do modelo, conforme Figura 4.16. Este círculo além de responsável por auxiliar na calibração, pois permitia uma maior acuracidade de referenciar o modelo virtual no cenário real, também ficou responsável por todas as movimentações do modelo virtual, eliminando deslocamentos ao tocar a tela. Por fim, para eliminar toques involuntários foi incluído o botão calibrar que remove o círculo e impossibilita qualquer movimentação da projeção.

O tamanho do círculo também foi avaliado pelos usuários durante a avaliação por inspeção. Círculos pequenos favoreciam a calibração, pois eram mais fáceis de posicionar seu centro no rebite de referência. Por outro lado, quanto menor o círculo mais difícil era a tarefa do usuário realizar movimentações e rotações. O tamanho considerado ideal foi feito após algumas interações.

A forma de rastreamento foi outra dificuldade encontrada nas avaliações. Os primeiros

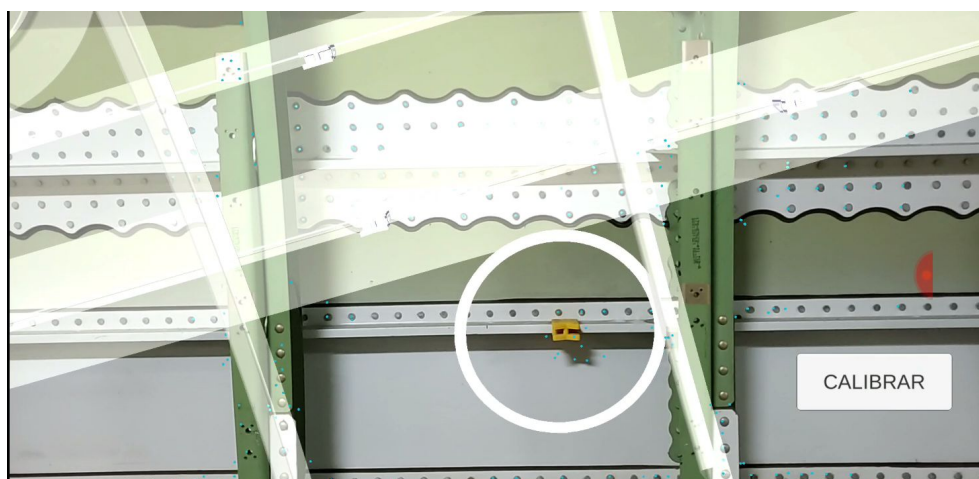


Figura 4.16: Circulo de referência do objeto virtual.

modelos foram criados utilizando apenas rastreamento de planos verticais. Como o modelo possui curvatura, o plano rastreado ficava deslocado conforme mostrado na Figura 4.17. Para corrigir este problema foi alterado o rastreamento para planos verticais e horizontais, além da utilização do *script* ElevationManipulator disponível nos exemplos do ARCore.

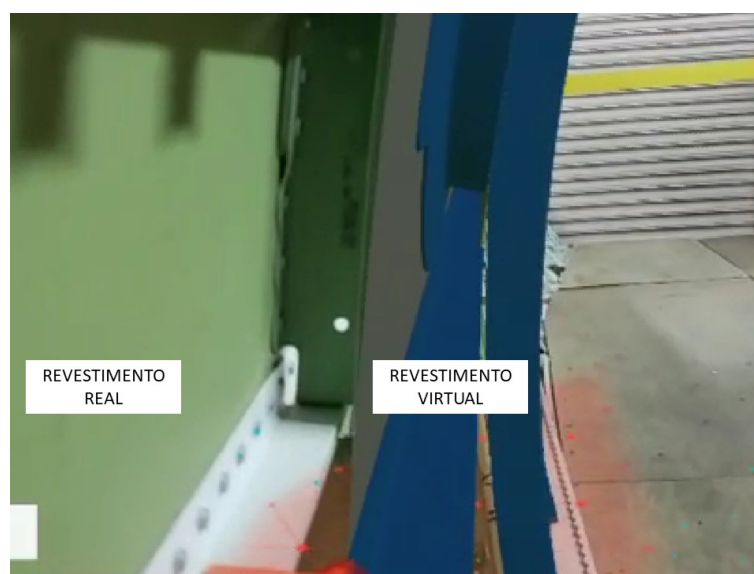


Figura 4.17: Vão entre o revestimento real e virtual.

Apesar da significativa melhoria com o rastreamento, os usuários reportaram uma instabilidade do modelo durante a marcação, à medida em que se aproximavam dos suportes e rotacionavam a câmera. Na Figura 4.18 é possível notar como o perfil virtual se afasta (imagem da esquerda) e se aproxima (imagem da direita) do perfil real quando o usuário rotaciona o dispositivo. Para corrigir o problema identificado os pontos auxiliares de ancoragem foram posicionados nas interseções entre perfis e cavernas, a fim de que a cena sempre tenha uma referência visível para a câmera.

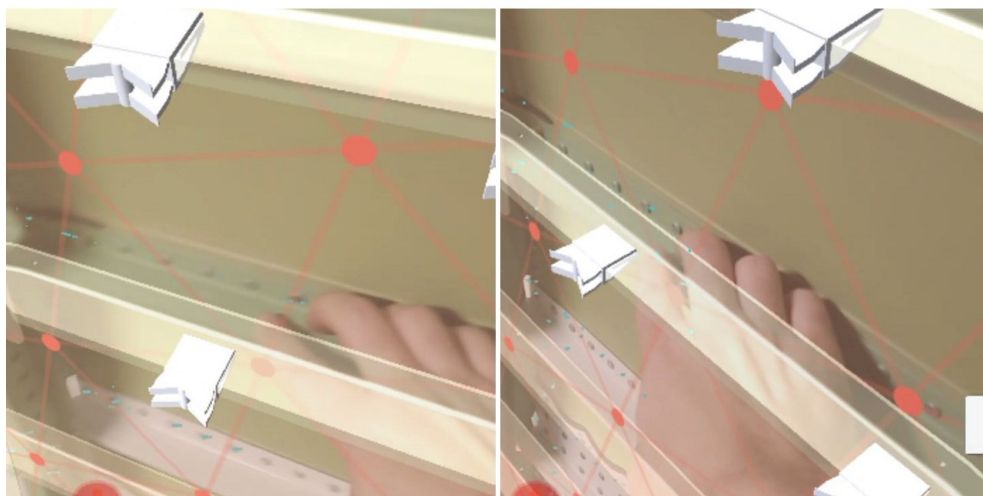


Figura 4.18: Variação da posição do modelo quando o ponto de referência não está visível.

Por fim, os avaliadores indicaram que o plano detectado algumas vezes gerava dúvida durante a marcação pois era confundido com o modelo. Por conseguinte, o plano passou a ser ocultado após a calibração. Ainda foi relatado que manter os perfis e cavernas virtuais sempre visíveis ajudaria na localização dos suportes no modelo. Quando a estrutura de referência foi ocultada, e apenas os suportes foram exibidos, os usuários sentiram dificuldade de localização em relação a estrutura real.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Aplicativo

A primeira fase de utilização do aplicativo de RA para posicionamento de suportes consistiu na calibração dos modelos. Durante o procedimento padronizado para calibração, os usuários confirmaram que selecionar na tela uma referência do cenário facilitava a execução da atividade, conforme previamente proposto nas avaliações por inspeção.

O ajuste final da calibração pelo usuário foi necessário em quase todos os casos, pois, em sua maioria, os modelos surgiam rotacionados em relação ao cenário, conforme Figura 5.1



Figura 5.1: Modelo rotacionado durante a calibração.

O ajuste final do modelo foi realizado pelos usuários por meio de toques na tela, na região definida de ajuste, até o total alinhamento entre o objeto virtual e o cenário real. A Figura 5.2 ilustra os movimentos necessários de ajuste até que o modelo fique alinhado para que se possa finalizar a calibração.

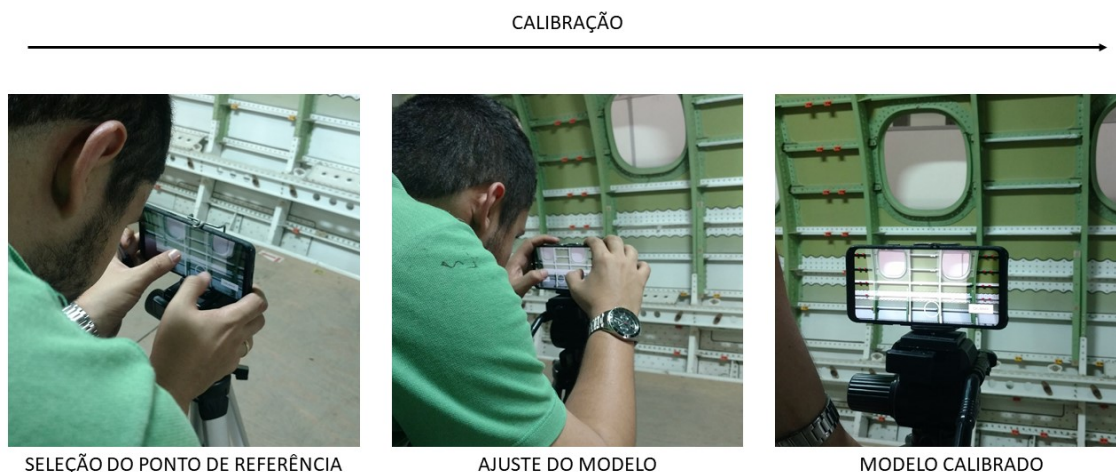


Figura 5.2: Ajuste do modelo pelo usuário durante a calibração.

Os usuários que não relataram o uso diário de dispositivos com *touchscreen* para jogar apresentaram dificuldades para alinhar as referências do objeto virtual com o cenário, o que ocasionou um elevado tempo de calibração. Os principais motivos identificados por eles foram a sensibilidade ao toque e a necessidade de uma elevada concentração para realizar a atividade. A mesma dificuldade não foi citada pelos usuários familiarizados com jogos que utilizem *touchscreen*.

Ao final das diversas repetições foi relatado também a necessidade de uma melhoria na ergonomia durante a calibração. Usuários altos reportaram dores na região lombar e pescoço após várias repetições, acredita-se que o desconforto ocorreu devido a posição curva em que estavam durante a calibração (Figura 5.3). Uma sugestão para não repetir o desconforto seria realizar uma calibração sem o tripé e em sua própria altura.

A remoção do *smartphone* do tripé também foi apontada como ponto de melhoria. Como a câmera do dispositivo utilizado ficava próxima a extremidade esquerda, diversas vezes os usuários a cobriam com as mãos no momento de remover, o que comprometia a calibração realizada. Utilizar dispositivos com uma câmera central ou acoplar uma câmera auxiliar na parte central do *smartphone* poderiam ser pontos de melhoria para utilizar a solução de RA em processos produtivos.

Durante a marcação dos primeiros modelos, os usuários, independentemente se já haviam utilizado RA anteriormente, sentiram dificuldade em se localizar no cenário e tinham dúvidas sobre o que era real e o que era virtual daquilo que aparecia na tela. Foi comum a utilização do



Figura 5.3: Posição do usuário durante a calibração.

tato na estrutura, conforme Figura 5.4 para que eles se localizassem. Este fenômeno tornou-se raro a medida em que ocorreram as repetições, chegando a não se repetir nos últimos testes de todos os usuários.



Figura 5.4: Usuário distinguindo o modelo virtual do cenário real.

Realizar a marcação da posição dos suportes foi uma atividade simples para todos os usuários. Apesar da localização da câmera no lado esquerdo do *smartphone*, usuários destros (Figura 5.5) e canhotos (Figura 5.6) não apresentaram problemas de visualização ou instabilidade do modelo virtual devido a oclusão parcial do cenário. Todos os suportes virtuais mantiveram-se estáveis mesmo com a aproximação da câmera.

Apesar de não ser apontado como um problema, a oclusão pode ser uma melhoria do aplicativo, pois ela auxiliaria os usuários a identificar o ponto exato onde a caneta, utilizada para realizar a marcação, encontra o objeto virtual e também contribuiria no seu senso espacial durante a marcação.

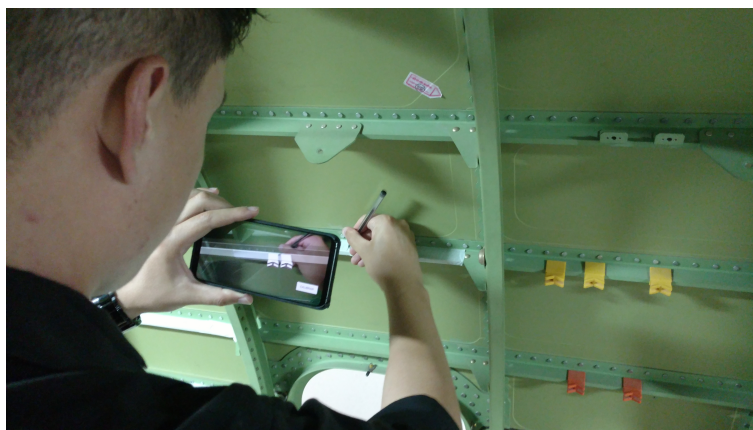


Figura 5.5: Usuário destro realizando a marcação.



Figura 5.6: Usuário canhoto realizando a marcação.

5.2 Análise estatística

5.2.1 Análise do tempo de realização da atividade

Inicialmente, foi realizada uma análise descritiva para as variáveis Tempo e Erro em estudo. De acordo com a Tabela 5.1, no geral, os tempos analisados, calibração e marcação, possuem uma média de 2,44 minutos, com mínimo de 1,15 e máximo de 7,67 minutos. Observa-se uma amplitude moderada na variável, e consequentemente uma variação de 39,90%. Em seguida, verificou-se a partir do teste de Shapiro-Wilk, com significância de 5%, que a variável Tempo não possui uma distribuição normal ($p < 0,01$).

Tabela 5.1: Medidas descritivas para a variável tempo (em minutos).

Min	1º Quartil	Mediana	Média	2º Quartil	Máx.	Desvio padrão	CV
1,15	1,90	2,50	2,74	3,39	7,67	1,09	43,75

O histograma da Figura 5.7 confirma essa ausência de normalidade, em que se observa uma assimetria à direita com concentração de dados no intervalo de 1 a 4 minutos. O tempo médio geral, obtido com o processo utilizando RA e o processo com escala, está representado pela linha pontilhada.

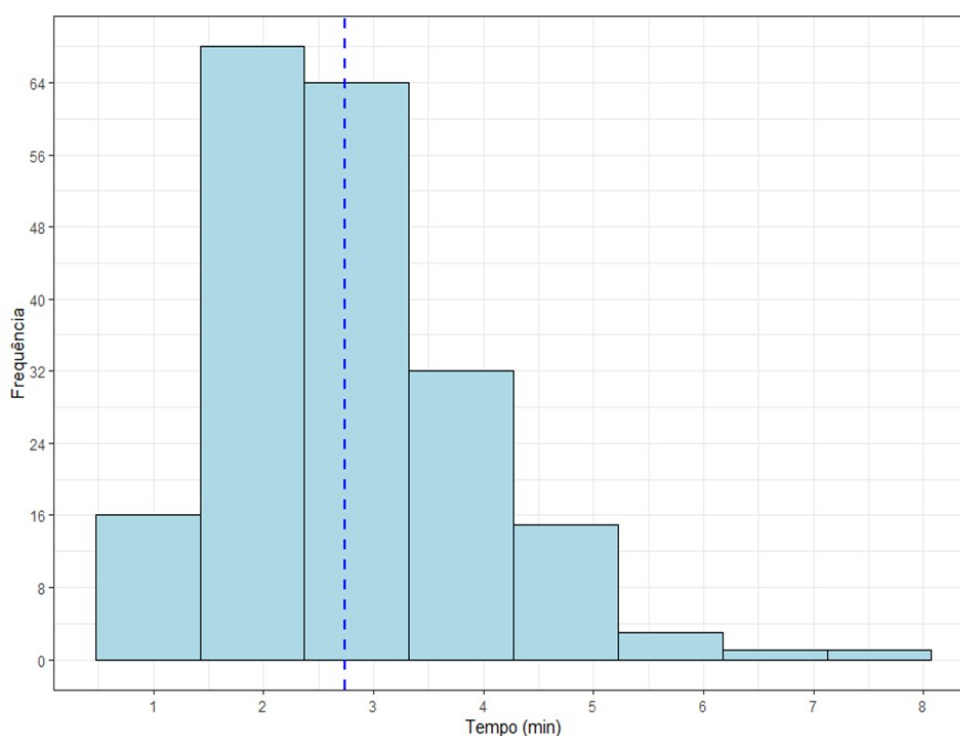


Figura 5.7: Histograma da variável tempo (em minutos).

Também foi analisado o comportamento do tempo para cada indivíduo e para cada modelo, separadamente. A Tabela 5.2 apresenta as medidas descritivas para cada um dos 5 indivíduos que utilizaram o aplicativo de RA.

Tabela 5.2: Medidas descritivas de tempo (em minutos) para cada indivíduo em estudo.

	Indivíduos					p*	Sem RA	p**
	I	II	III	IV	V			
$\mu \pm \sigma$	2,324 \pm 1,077	2,098 \pm 0,627	2,424 \pm 0,726	2,820 \pm 0,707	4,037 \pm 1,042		3,643 \pm 3,613	
Mínimo	1,150	1,167	1,383	1,600	2,550		0,533	
1º Quartil	1,587	1,512	1,917	2,371	3,329		0,683	
Mediana	1,867 ^C	1,975 ^C	2,333 ^{BC}	2,642 ^B	3,858 ^A	<0,001	1,017	=0,0537
3º Quartil	2,958	2,633	2,925	3,133	4,450		7,583	
Máximo	5,167	3,150	4,517	4,367	7,667		9,733	
CV (%)	46,434	29,886	29,950	25,071	25,811		99,177	

Onde μ é a média; σ é o desvio padrão; e CV é o coeficiente de variação (dado pela razão σ/μ). O p^* foi obtido por meio do Teste de Kruskal-Wallis, e pós-teste de Dunn, para comparar os resultados do tempo mediano gasto com o uso do aplicativo de RA. Letras iguais indicam que não há diferença estatisticamente significativa entre os grupos. O p^{**} foi obtido por meio do Teste U de Mann-Whitney para comparar se o tempo mediano entre o uso de RA foi estatisticamente maior do que Sem RA. O nível de significância considerado nos testes foi de 5%.

Pela Tabela 5.2, nota-se que o Indivíduo II possui a menor média de tempo, enquanto o Indivíduo V possui a maior. Ao comparar o CV, nota-se que os Indivíduos IV e V possuem quase o mesmo percentual, enquanto o Indivíduo I possui um valor muito maior. Em relação ao tempo gasto com o uso do aplicativo de RA, observa-se que houve diferença significativa no tempo mediano entre os cinco voluntários ($p < 0,001$), pelo teste de Kruskal-Wallis. Dentre estes voluntários, pelo teste de comparações múltiplas I, II e III apresentaram tempos medianos mais baixos e semelhantes entre si. Em relação ao tempo gasto com e sem o uso de RA, a partir dos dados amostrais coletados, há indícios de que os tempos medianos são semelhantes ($p=0,0537$). Contudo, constatou-se uma grande variabilidade entre as medições dos indivíduos. Pelo boxplot da Figura 5.8, fica claro observar as diferenças entre os tempos por indivíduos.

Os resultados mostrados no boxplot (Figura 5.8) podem ser explicados devido à dificuldade de alguns indivíduos em realizar a calibração, evidenciada pelos quatro pontos de *outliers* nos Indivíduos I, III e V, todos eles excedendo o limite superior. Nos primeiros testes, alguns indivíduos também tiveram maior tempo de execução pela dificuldade em discernir o que era o modelo virtual e o que era parte do cenário. Além deste fato, a abordagem considerou o tempo mediano de utilização de todos os cinco modelos, os quais possuem diferentes complexidades. Modelos mais complexos exigiam uma maior organização do usuário para realizar a tarefa de uma forma mais rápida, pois tinham que buscar no cenário onde estavam os suportes.

Analisando as medidas descritivas em relação a cada modelo, como segue na Tabela 5.3, observa-se que o modelo com menor média de tempo é o 2 seguido do 1 e 3, com 1,791, 2,080 e

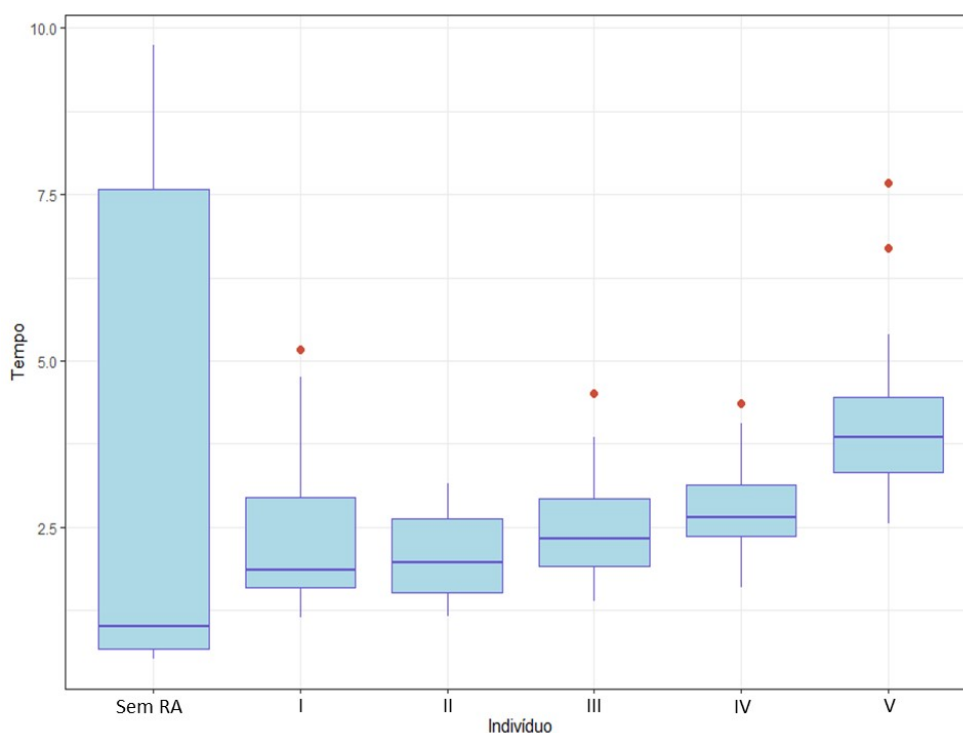


Figura 5.8: Distribuição do tempo de medição (em minutos) por indivíduo.

2,121 minutos respectivamente. Analisando a mediana é possível verificar que não há diferença estatisticamente significativa entre eles.

Tabela 5.3: Medidas descritivas de tempo (em minutos) para cada modelo em estudo.

	Modelo					p
	1	2	3	4	5	
$\mu \pm \sigma$	2,281 \pm 1,075	1,977 \pm 0,931	2,321 \pm 0,980	3,269 \pm 1,700	4,357 \pm 1,781	
Mínimo	0,667	0,533	0,683	1,400	2,733	
1 ^o Quartil	1,500	1,283	1,700	2,250	3,133	
Mediana	2,033 ^C	1,883 ^C	2,100 ^C	2,600 ^B	3,783 ^A	<0,001
3 ^o Quartil	2,900	2,450	2,950	3,667	4,633	
Máximo	5,267	4,400	5,333	7,833	9,733	
CV (%)	47,1288	47,092	42,233	52,004	40,877	

Onde μ é a média; σ é o desvio padrão; e CV é o coeficiente de variação. O p foi obtido por meio do Teste de Kruskal-Wallis, e pós-teste de Dunn, para comparar os resultados do tempo mediano gasto por tipo de modelo. Letras iguais indicam que não há diferença estatisticamente significativa entre os grupos. O nível de significância considerado nos testes foi de 5%.

Na Figura 5.9, verifica-se que os tempos de medições dentro de cada modelo não seguiram um comportamento padrão, o que pode ser verificado pela assimetria em relação ao tempo mediano em cada modelo.

Pelo boxplot (Figura 5.9) é possível notar que todos os modelos apresentaram pontos de outliers excedendo o limite superior. Parte dos pontos, em especial nos modelos 1 a 3, é explicado pela calibração que é o mesmo processo independentemente da complexidade do modelo.

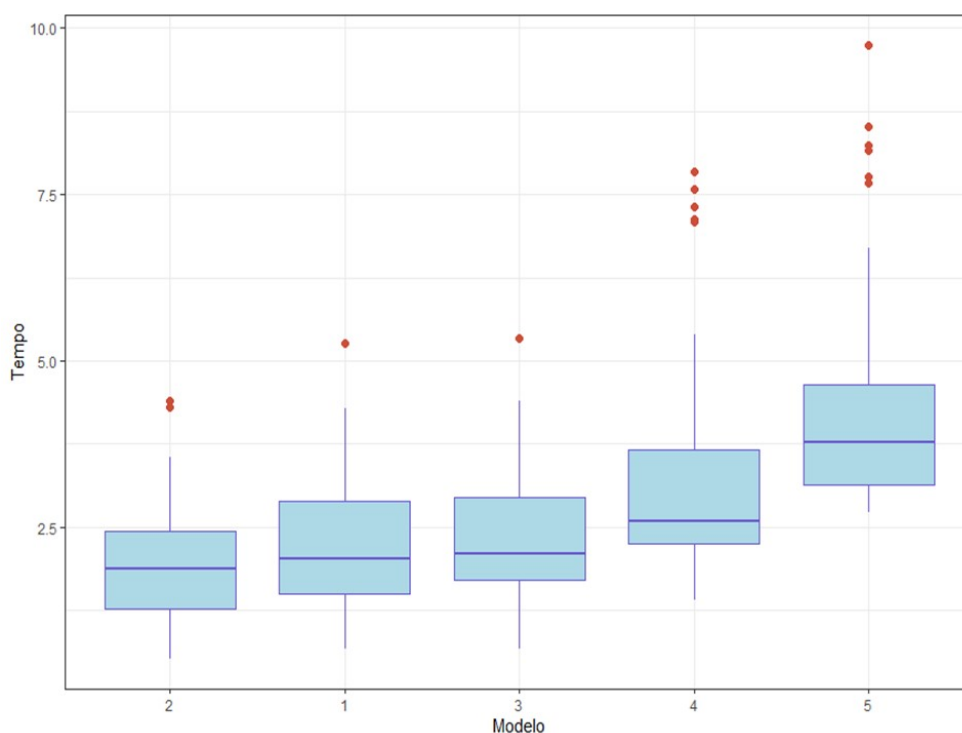


Figura 5.9: Distribuição do tempo de medição (em minutos) por modelo.

Para os modelos 4 e 5 um número maior de outliers é notado devido a organização dos usuários na realização da atividade. Em alguns experimentos, ao realizar esses modelos, os usuários tiveram que retornar às regiões por onde já tinham passado, pois esqueceram de marcar algum ponto ou queriam conferir que todos os pontos foram marcados.

Pelo gráfico de interação da Figura 5.10 é possível verificar como a relação entre os Modelos e o tempo gasto depende, também, do indivíduo. Neste gráfico as médias de tempos para cada modelo são exibidas em linhas separadas para cada um dos indivíduos. Verifica-se que há uma interação complexa, pois além do uso de modelos distintos determinarem diferentes durações, elas também variam de indivíduo a indivíduo.

Diferentes metodologias para avaliar a adaptabilidade e a estabilidade de fatores que ocorrem simultaneamente e possuem efeitos de interação significativos têm sido desenvolvidas e, ou, aprimoradas. Tais procedimentos se baseiam em análise de variância, regressão linear, regressão não linear, análises multivariadas e estatísticas não paramétricas (GODOI, 2016).

Neste estudo, houve a violação das pressuposições de normalidade ($p < 0,001$), pelo teste de Shapiro-Wilk e de homogeneidade ($p < 0,001$), pelo teste de Levene, considerando o estudo do tempo em relação a interação Modelo x Indivíduo. Além disso, não houve uma transformação específica que fosse ideal para cada variável estudada. Assim, por fazer mais sentido prático, optou-se por verificar o comportamento dos indivíduos dentro de cada modelo, conforme apre-

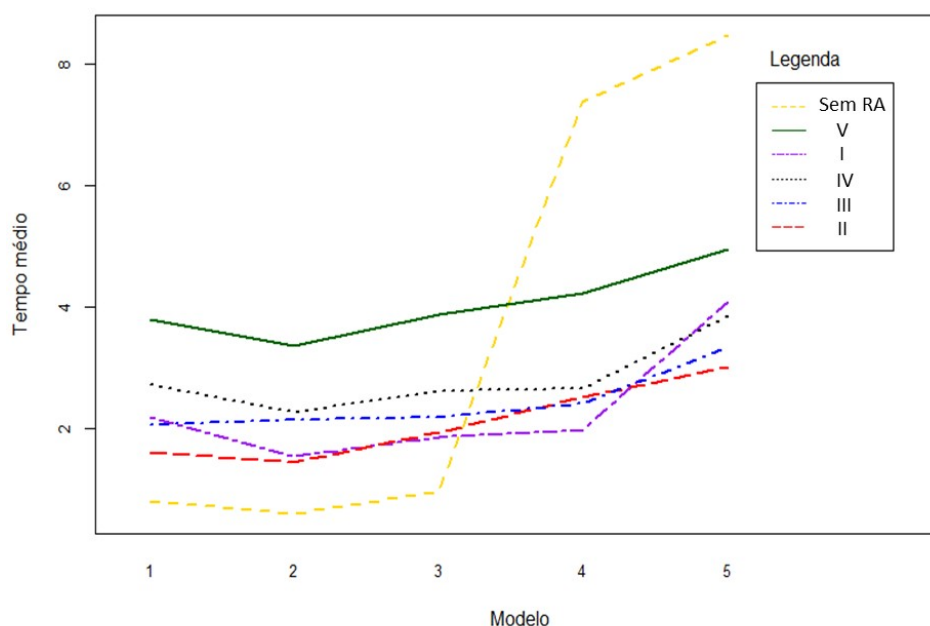


Figura 5.10: Gráfico de interação para o tempo médio de medições em 5 Modelos e por 5 Indivíduos.

sentado na Tabela 5.4.

A Tabela 5.4 apresenta uma matriz de médias de tempo de cada indivíduo em cada um dos modelos considerados. Através dessa tabela é possível analisar a variação dos tempos dos indivíduos entre os modelos. É possível notar, por exemplo, que o Indivíduo II possui as melhores médias de tempos nos modelos 1, 2 e 5 (1,598, 1,438 e 2,998 minutos, respectivamente), enquanto para o Modelo 4 possui apenas o terceiro melhor tempo (2,517 minutos). Entretanto, para o Indivíduo I, os modelos 3 e 4 possuem a melhor média de tempo. Além disso, pode-se observar interações simples e complexas.

Os resultados da Tabela 5.4 mostram que, pelos testes de comparações múltiplas para todos os modelos, os dados coletados indicaram não haver igualdade entre os tempos de medição entre os indivíduos. Além disso, para cada modelo, verificou-se tempos de medição distintos entre usar ou não RA ($p < 0,001$, pelo Teste U de Mann-Whitney).

Para identificar se a diferença de tempo ocorria por meio calibração ou marcação, foi analisado o tempo para essas fases isoladamente. Na fase de calibração foi possível notar uma diferença significativa entre os indivíduos. No entanto, entre os modelos há evidências que os tempos medianos de calibração são semelhantes ($p = 0,5037$, pelo teste de Kruskal-Wallis). Desta forma, pode-se afirmar que o aumento da complexidade do modelo não aumenta a difi-

Tabela 5.4: Análise descritiva de médias de tempo (em minutos) por tipo de modelo e por indivíduo.

	Indivíduos					p
	I	II	III	IV	V	
Modelo 1						
$\mu \pm \sigma$	2,179 \pm 0,82	1,598 \pm 0,306	2,052 \pm 0,366	2,715 \pm 0,661	3,792 \pm 0,796	<0,001
Mediana	1,808 ^{BC}	1,467 ^C	1,975 ^{BC}	2,675 ^{AB}	3,758 ^A	
Mínimo - Máximo	1,283 - 3,733	1,25 - 2,117	1,5 - 2,867	1,6 - 4,05	2,55 - 5,267	
CV (%)	37,600	19,200	17,800	24,300	21,000	
Modelo 2						
$\mu \pm \sigma$	1,54 \pm 0,377	1,438 \pm 0,206	2,144 \pm 0,653	2,273 \pm 0,278	3,36 \pm 0,601	<0,001
Mediana	1,417 ^B	1,467 ^B	2,075 ^{AB}	2,242 ^{AB}	3,158 ^A	
Mínimo - Máximo	1,15 - 2,25	1,167 - 1,8	1,383 - 3,55	1,917 - 2,733	2,683 - 4,4	
CV (%)	24,500	14,300	30,500	12,200	17,900	
Modelo 3						
$\mu \pm \sigma$	1,848 \pm 0,346	1,94 \pm 0,168	2,185 \pm 0,632	2,613 \pm 0,463	3,869 \pm 0,682	<0,001
Mediana	1,733 ^B	1,925 ^B	2,242 ^B	2,500 ^{AB}	3,775 ^A	
Mínimo - Máximo	1,383 - 2,467	1,75 - 2,283	1,383 - 3,117	2 - 3,483	2,983 - 5,333	
CV (%)	18,700	8,600	28,900	17,700	17,600	
Modelo 4						
$\mu \pm \sigma$	1,971 \pm 0,486	2,517 \pm 0,192	2,398 \pm 0,418	2,654 \pm 0,293	4,231 \pm 0,627	<0,001
Mediana	1,842 ^B	2,492 ^B	2,242 ^B	2,583 ^{AB}	4,058 ^A	
Mínimo - Máximo	1,4 - 3,133	2,25 - 2,8	2 - 3,083	2,283 - 3,183	3,4 - 5,4	
CV (%)	24,700	7,600	17,400	11,000	14,800	
Modelo 5						
$\mu \pm \sigma$	4,083 \pm 0,633	2,998 \pm 0,135	3,342 \pm 0,567	3,848 \pm 0,429	4,935 \pm 1,433	<0,001
Mediana	3,892 ^{AC}	3,025 ^B	3,167 ^{BC}	3,883 ^{AB}	4,767 ^A	
Mínimo - Máximo	3,25 - 5,167	2,733 - 3,15	2,783 - 4,517	2,967 - 4,367	3,333 - 7,667	
CV (%)	15,500	4,500	17,000	11,100	29,000	

Onde μ é a média; σ é o desvio padrão; e CV é o coeficiente de variação. O p foi obtido por meio do Teste de Kruskal-Wallis, e pós-teste de Dunn, para comparar os resultados do tempo mediano gasto por tipo de modelo. Letras iguais indicam que não há diferença estatisticamente significativa entre os grupos. O nível de significância considerado nos testes foi de 5%.

culdade de calibração. Os resultados da dispersão da calibração estão apresentados na Figura 5.11.

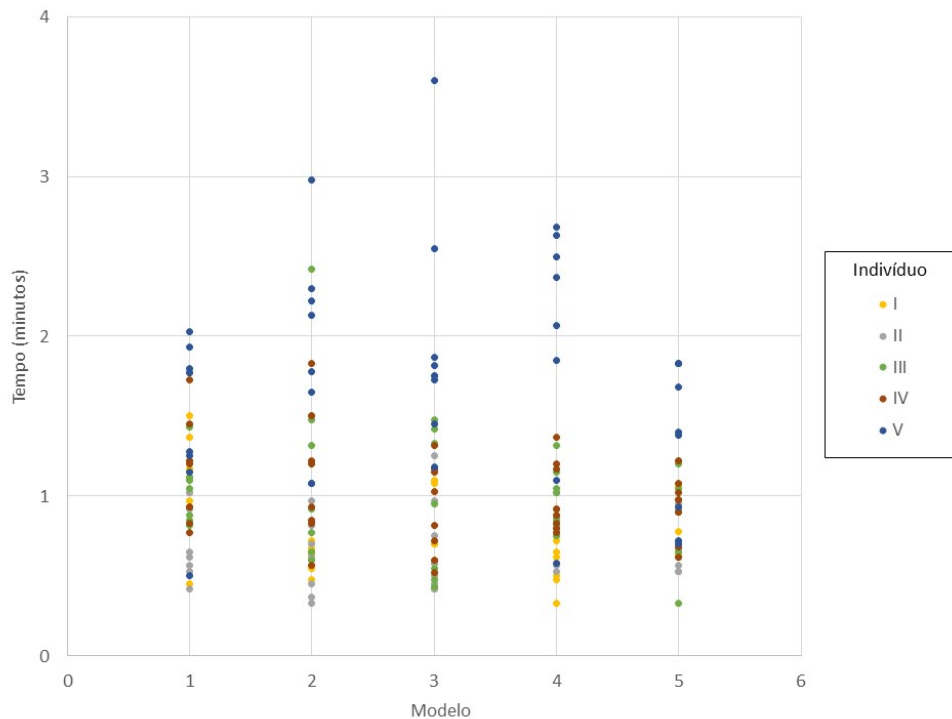


Figura 5.11: Gráfico de dispersão por modelo (eixo x) e por Indivíduo na calibração.

Baseado nos resultados é recomendável um melhor treinamento dos usuários na calibração, bem como uma nova forma de calibrar reduzindo a interação do indivíduo com o aplicativo.

Quando analisados os tempos de marcação, os resultados indicam que, apesar de todos passarem pelas mesmas repetições, há diferença significativa entre as pessoas ($p < 0,001$ pelo teste de Kruskal-Wallis). Ainda, quando analisado o tempo de marcação dentro de cada modelo, pode-se concluir que a variabilidade entre as pessoas não é homogênea ($p < 0,001$ quando normal e/ou homogêneo em alguns dos modelos) dentro do mesmo modelo. Os resultados da dispersão da marcação estão apresentados na Figura 5.12.

Devido à grande variação observada na calibração e marcação dos indivíduos dentro dos mesmos modelos, pode-se garantir que não houve memorização da posição dos suportes durante os experimentos, garantindo assim a independência entre as repetições de um mesmo indivíduo. Por outro lado, a dispersão também sugere a necessidade de um treinamento mais longo dos usuários no uso de RA para que eles se adaptem à sobreposição do virtual com o real, bem como propor no aplicativo uma sequência de montagem que deve ser seguida pelos indivíduos, evitando assim que eles se percam na realização da atividade.

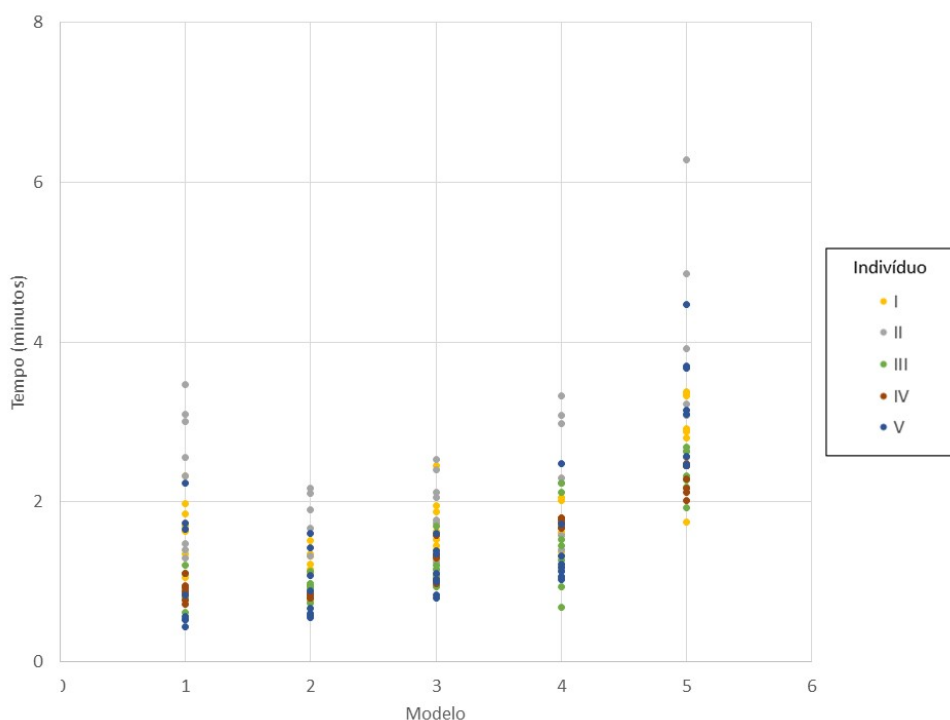


Figura 5.12: Gráfico de dispersão por modelo (eixo x) e por Indivíduo na marcação.

5.2.2 Análise do erro de posicionamento

De acordo com a Tabela 5.5, no geral, os erros analisados possuem uma média de -0,13mm, com mínimo de -33,2mm e máximo de 43,4mm. Observa-se uma amplitude de 76,6 mm e, consequentemente, um desvio padrão ($\sigma=6,93$) altos. Nesse caso, o desvio padrão maior que a própria média, indica que há uma enorme dispersão nos dados com relação à média, e muito afastados da média estão os eventos extremos.

Tabela 5.5: Medidas descritivas para a variável tempo (em minutos).

Min	1º Quartil	Mediana	Média	2º Quartil	Máx.	Desvio padrão
-33,20	-3,20	-0,50	-0,13	2,60	43,40	6,93

O Boxplot da Figura 5.13 mostra ausência de normalidade, em que se observa uma grande concentração de outliers (pontos em vermelho). O ponto mediano dos ERROS, obtidos com o uso do aplicativo com RA, refere-se à linha horizontal (erro = -0,5) dentro da caixa do boxplot). Esse ponto garante que 50% das observações encontram-se abaixo dele e as demais 50% acima. Além disso, verificou-se a partir do teste de Shapiro-Wilk, com significância de 5%, que a variável ERRO não possui uma distribuição normal ($p<0,001$).

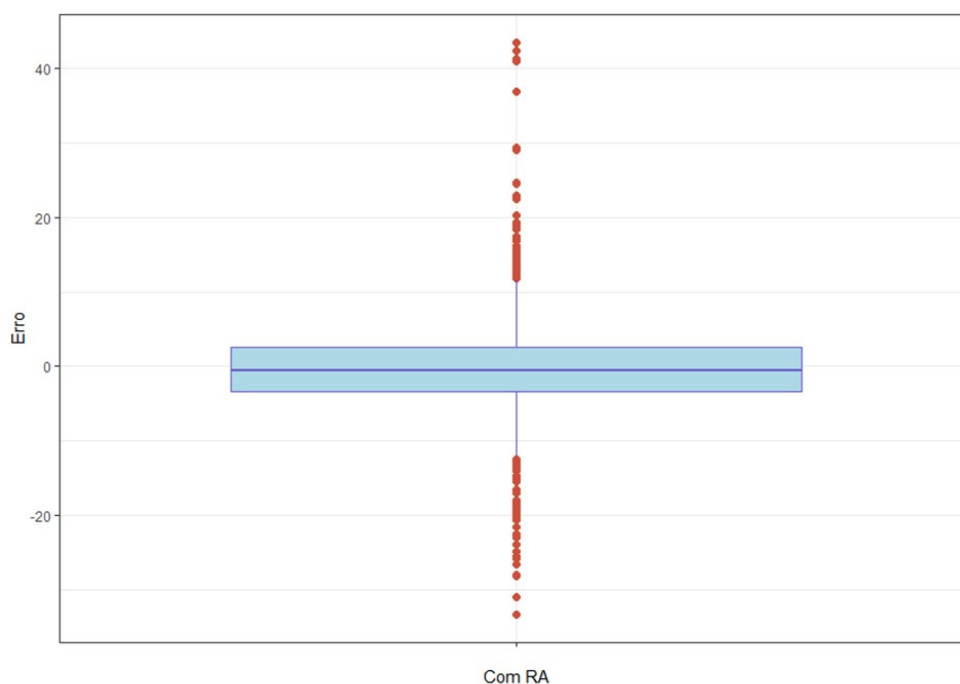


Figura 5.13: Boxplot da variável ERRO (em mm) das medições obtidas com o uso de RA.

Como os ERROS estão muito dispersos, uma alternativa foi investigar o comportamento destes em categorias. Dessa forma, foi analisado o comportamento do erro para cada indivíduo e para cada modelo, separadamente.

A Tabela 5.6 apresenta medidas descritivas para cada um dos 5 indivíduos que utilizaram o aplicativo. Nota-se que os indivíduos II e III possuem a menor média de erro, enquanto os indivíduos V e III possuem os menores desvio padrão de erro. Em relação ao ERRO de medição com o uso do aplicativo de RA, observa-se uma variabilidade muito grande em relação à cada indivíduo. Além disso, houve a violação das pressuposições de normalidade ($p < 0,001$), pelo teste de Shapiro-Wilk e de homogeneidade ($p < 0,001$), pelo teste de Levene, considerando o estudo do erro de medição em relação aos Indivíduos.

No boxplot da Figura 5.14, fica claro observar as diferenças entre os ERROS por indivíduos. Observa-se pontos de outliers em todos os indivíduos, onde os indivíduos I, II, III e IV obtiveram pontos acima do limite superior, e os indivíduos I, II, IV e V obtiveram pontos excedendo o limite inferior.

Os resultados mostrados no boxplot da Figura 5.14 podem ser explicados devido ao erro na calibração. Por exemplo, o indivíduo I na primeira repetição do modelo 2 marcou todos os suportes com um deslocamento de cerca de 40mm em relação à posição nominal, o que permite concluir que o modelo foi calibrado com um erro de 40mm, gerando os pontos de outliers que

Tabela 5.6: Medidas descritivas de erro (em mm) para cada indivíduo em estudo.

	Indivíduos				
	I	II	III	IV	V
$\mu \pm \sigma$	2,379 \pm 9,127	-0,186 \pm 8,528	-0.328 \pm 4,745	-1,694 \pm 6,267	-0,8385 \pm 3,677
Mínimo	-33,200	-30,900	-13,000	-22,900	-12,500
1º Quartil	-2,250	-2,800	-3,625	-4,000	-3,500
Mediana	1,400	-0,500	-0,550	-1,000	-0,800
3º Quartil	6,800	2,325	2,800	0,825	1,825
Máximo	43,400	29,200	16,000	24,600	9,200
p*	<0,001				
p**	<0,001				

Onde μ é a média; σ é o desvio padrão; e CV é o coeficiente de variação. O p^* foi obtido por meio do Teste de Shapiro-Wilk, para verificar normalidade. O p^{**} foi obtido por meio do Teste de Levene, para verificar homogeneidade de variâncias. O nível de significância considerado nos testes foi de 5%.

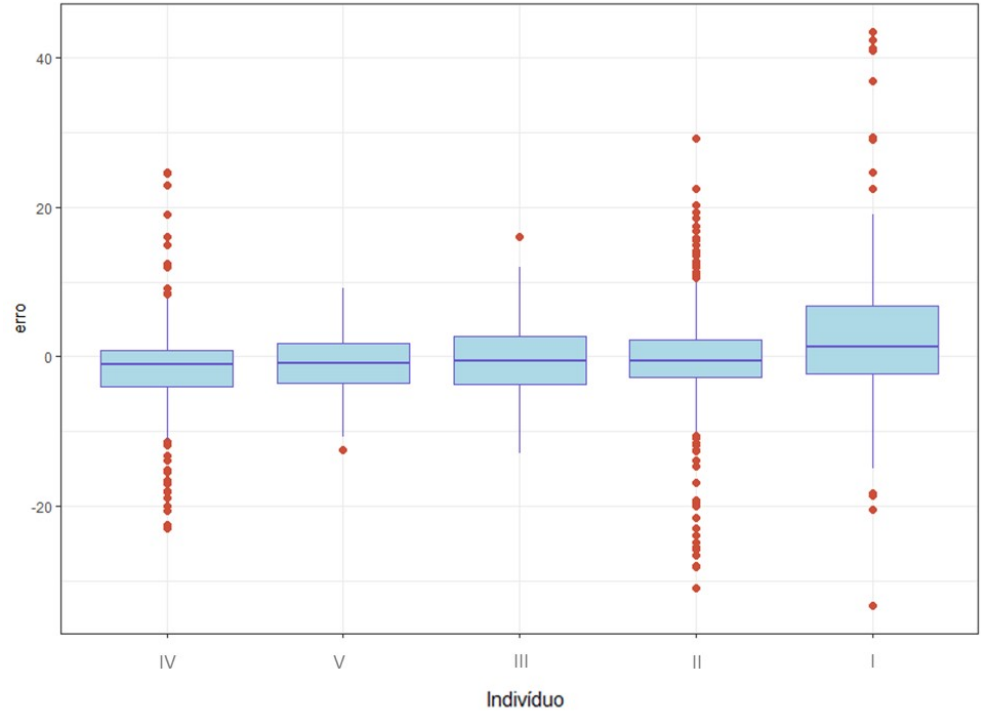


Figura 5.14: Distribuição da variável ERRO (em mm) por indivíduo

mais se destacam na Figura 5.14.

Analisando as medidas descritivas em relação a cada modelo, como segue na Tabela 5.7, observa-se que o modelo com menor média de erro é o 2 seguido do modelo 1, com 0,030mm e 0,310mm, respectivamente. Na Figura 5.15, verifica-se que os erros de medições dentro de cada modelo não seguiram um comportamento padrão, o que pode ser verificado pela assimetria em relação ao tempo mediano em cada modelo.

Tabela 5.7: Medidas descritivas de erro (em mm) para cada modelo.

	Modelos				
	1	2	3	4	5
$\mu \pm \sigma$	0,310 \pm 6,478	0,030 \pm 8,030	-0,808 \pm 4,057	-1,484 \pm 8,361	0,677 \pm 6,638
Mínimo	-33,200	-26,600	-13,800	-30,900	-23,000
1ºQuartil	-2,900	-3,200	-2,525	-4,425	-3,500
Mediana	-0,200	-0,600	-0,800	-0,500	-0,200
3ºQuartil	2,800	1,975	0,800	2,500	3,800
Máximo	29,400	43,400	16,200	24,600	29,000
p*	<0,001				
p**	<0,001				

Onde μ é a média e σ é o desvio padrão. O p^* foi obtido por meio do Teste de Shapiro-Wilk, para verificar normalidade. O p^{**} foi obtido por meio do Teste de Levene, para verificar homogeneidade de variâncias. O nível de significância considerado nos testes foi de 5%.

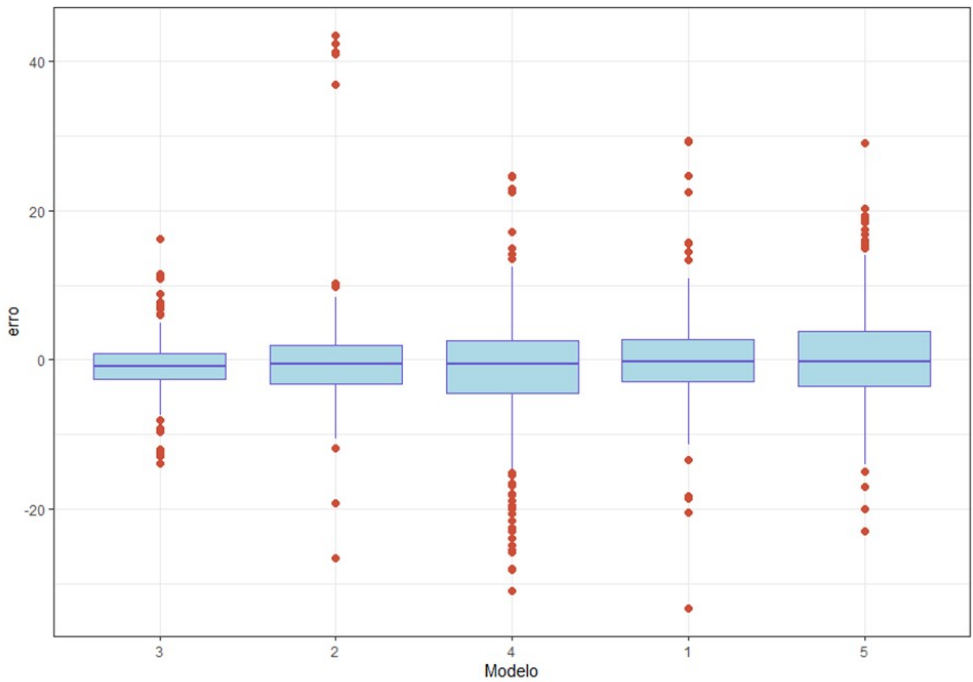


Figura 5.15: Distribuição da variável ERRO (em mm) por indivíduo.

Analisando o erro por tipo de modelo, é possível notar que o ponto mediano encontra-se

próximo a zero. No entanto, a dispersão entre os dados é grande, visto que todos os modelos apresentaram pontos de outliers excedendo tanto o limite superior quanto o inferior. A grande dispersão encontrada não permite concluir que as medições feitas via aplicativo são equivalentes ao padrão utilizando escala métrica.

Pelo gráfico de interação da Figura 5.16 é possível verificar como a relação entre os Modelos e os ERROS de medição encontrados depende, também, do Indivíduo. Cada linha deste gráfico representa as médias de erros obtidas por cada indivíduos, relativas aos erros obtidos em cada modelo.

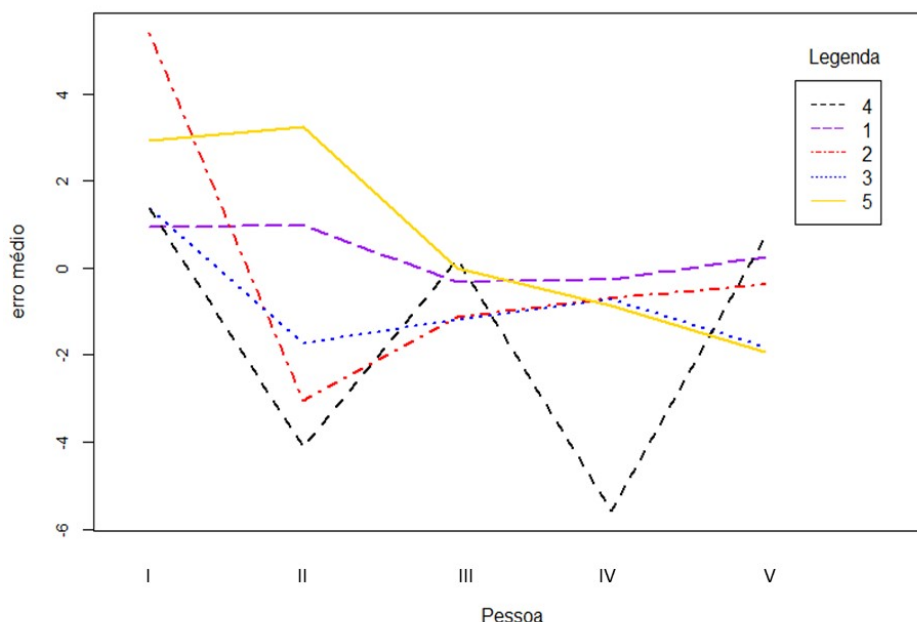


Figura 5.16: Gráfico de interação para o erro médio de medições em 5 Modelos e por 5 Indivíduos.

Além da falta de padronização nos erros de medição encontrada pelo gráfico da interação, foi verificada a violação das pressuposições de normalidade ($p < 0,001$), pelo teste de Shapiro-Wilk e de homogeneidade ($p < 0,001$), pelo teste de Levene, considerando o estudo do efeito da interação Modelo x Indivíduo sobre os ERROS. Além disso, não houve uma transformação específica que fosse ideal para cada variável estudada.

Diferentemente do ocorrido na análise da variável TEMPO, não foi possível analisar o comportamento da variável ERRO em relação aos Indivíduos dentro de cada Modelo, pois foi verificada a não homogeneidade entre Indivíduos dentro de cada um dos Modelos ($p < 0,001$ pelo teste de Levene).

Capítulo 6

CONCLUSÃO

6.1 Contribuições

Processos manuais auxiliados por RA têm sido amplamente divulgados na literatura, mas a maioria é baseada em marcadores artificiais, que sofrem não apenas com a poluição visual, mas também com os efeitos complexos de operação. Este trabalho apresentou uma aplicação que elimina a utilização destes marcadores e simula um processo de montagem de suportes em uma estrutura aeronáutica semi-monocoque.

A vantagem deste estudo em relação a outras soluções existentes no mercado é sua concepção com dispositivos e plataformas de fácil acesso no mercado ou de código aberto, o que torna o projeto com um possível custo menor a outras soluções disponíveis no mercado. Além deste ponto, a adaptação do aplicativo a diversos modelos é relativamente simples e pode ser manipulada sem grandes conhecimentos de desenvolvimento móvel.

O desenvolvimento realizado neste trabalho atendeu a todos os requisitos, funcionais e não funcionais, que foram propostos com base nos principais desafios e limitações da RA em ambientes de produção, identificados pela RSL. Com o aplicativo desenvolvido, pôde-se concluir que a RA possui maturidade para ser utilizada como método alternativo de algumas montagens em estruturas metálicas aeronáuticas. No entanto, deve-se avaliar o requisito de tolerância da montagem e realizar treinamentos com os usuários a fim de adaptá-los à imersão e consequentemente reduzir variações de medidas de posição e de tempo de utilização.

No estudo de caso realizado o erro de posicionamento entre a montagem com RA e com escala metálica foi máximo de 43,40mm e mínimo de 33,20mm. Acredita-se que com a variação encontrada o aplicativo atenderia as necessidades de instalação de suportes de fixação de componentes flexíveis, como cabos, no entanto poderia não ser suficiente para garantir a instalação de estruturas de fixação de componentes rígidos, como dutos ou tubos.

Pela análise estatística do tempo, destaca-se que a RA é um processo vantajoso para mon-

tagens complexas, que necessitem de diversas interações do usuário no processo produtivo. No entanto, para processos simples, neste estudo compostos de montagens de até 6 suportes, os métodos tradicionais apresentaram-se mais eficientes.

Os resultados obtidos servem de base para aplicações similares em outros setores industriais, como por exemplo o automobilístico e o naval que possuem características de montagem semelhantes.

6.2 Inserção social

Por se tratar de uma solução com valor de investimento muito menor às demais existentes no mercado, o foco principal é que ela seja levada a empresas de pequeno e médio porte que não possuem capital elevado de investimento em novas tecnologias.

O resultado da solução desenvolvida neste trabalho caracteriza-se como uma inovação incremental de processo a qual permite uma maior flexibilidade na linha de produção e tem potencial, quando associada a outras ferramentas, de aumentar a produtividade.

Além da utilização do aplicativo para fins de produção o mesmo também pode ser utilizado na área do ensino, familiarizando estudantes com estruturas aeronáuticas e processos produtivos e de manutenção aeronáutico.

6.3 Perspectivas Futuras

A continuidade do trabalho deve seguir duas linhas para que a solução se torne factível de utilização em um ambiente de produção. A primeira é com relação a importação dos modelos CAD para o Unity de forma gratuita. Durante o desenvolvimento foi utilizada uma solução paleativa com a finalidade de validar a solução final. No entanto, vale destacar que a mesma solução não seria gratuita para empresas.

A segunda diz respeito ao aplicativo em si. O primeiro ponto que se destaca como um trabalho futuro é a calibração. A forma atual é dependente da atenção do usuário em selecionar o ponto correto e realizar ajustes caso julgue necessário. Este processo demanda um tempo significativo e exige concentração do usuário em comparar as linhas as linhas do modelo com as linhas do cenário. Ainda na calibração o método utilizado para uma aplicação comercial deve considerar a ergonomia dos usuários, visto que durante os testes já foi identificado que a posição inicial pode gerar desconforto em algumas pessoas.

Para aprimorar o aplicativo, estudos futuros deveriam incluir uma análise dos efeitos da oclusão, sobreposição de objetos reais aos objetos virtuais, no posicionamento dos suportes e na localização espacial dos usuários, relatando se a variação no posicionamento e o tempo total para realizar a atividade foram reduzidos.

Com o objetivo de aumentar a mobilidade, aconselha-se também aprimorar o aplicativo de forma que ele possa ser utilizado em um cardboard. A solução apresentaria baixo custo e permitiria que os usuários pudessem utilizar ambas as mãos para a marcação além de resolver o problema da ocultação da imagem pela mão do usuário que segura o dispositivo.

Nas análises dos modelos, dois estudos futuros são recomendáveis. O primeiro analisando o erro em função da distância do ponto de referência. Esta análise permite otimizar o tamanho da região de trabalho com apenas uma calibração. O segundo, analisando o efeito da variação das condições de luminosidade sobre a estabilidade das projeções, propondo assim os limites superior e inferior da iluminação do ambiente que não impactem os resultados obtidos neste estudo.

6.4 Lista de publicações

A seguir são apresentadas as publicações resultantes das pesquisas realizadas no decorrer deste trabalho. No entanto, cabe ressaltar que os resultados obtidos nesta dissertação estão sendo processados para novas publicações em outros periódicos.

1. CARDOSO, L. F. DE S., ZORZAL, E. R. (2018). An Augmented Reality Review on Production Environments. 2018 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR). Presented at the 2018 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR). <https://doi.org/10.1109/svr.2018.00030> (Aceito, Anexo B e C).

2. DE SOUZA CARDOSO, L. F., MARTINS QUEIROZ MARIANO, F. C., ZORZAL, E. R. (2019). A Survey of Industrial Augmented Reality. Computers & Industrial Engineering, 106159. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106159> (Aceito, Anexo D)

REFERÊNCIAS

AGRESTI, A. *An introduction to categorical data analysis*. 2nd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. 400 p. ISBN 0471226181.

AZUMA, R. A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, v. 4, p. 355–385, 1997.

AZUMA, R. et al. Recent Advances in Augmented Reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, v. 21, n. 6, p. 1–27, 2001. ISSN 18734316. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17691992>.

AZUMA, R. T. The Most Important Challenge Facing Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, v. 25, n. 3, p. 234–238, 2016. ISSN 1054-7460. Disponível em: http://www.mitpressjournals.org/doi/10.1162/PRES_a_00152 http://dx.doi.org/10.1162/PRES_a_00152.

BARBOSA, S. D. J.; SILVA, B. S. d. *Interação Humano-computador*. 1ª ed.. ed. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2010. 408 p. ISBN 8535234187.

BARNA, J. et al. Open source tools in assembling process enriched with elements of augmented reality. *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference on - VRIC '12*, p. 1, 2012. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2331714.2331717>.

BECHEIKH, N.; LANDRY, R.; AMARA, N. Lessons from innovation empirical studies in the manufacturing sector: A systematic review of the literature from 1993-2003. *Technovation*, v. 26, n. 5-6, p. 644–664, 2006. ISSN 01664972.

BILLINGHURST, M.; CLARK, A.; LEE, G. A Survey of Augmented Reality. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, v. 8, n. 2-3, p. 73–272, 2015. Disponível em: <http://www.nowpublishers.com/article/Details/HCI-049>.

BLANCO-NOVOA, O. et al. A Practical Evaluation of Commercial Industrial Augmented Reality Systems in an Industry 4.0 Shipyard. *IEEE Access*, v. 6, p. 1–1, 2018. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8281493/>.

BLANCO-PONS, S.; CARRIÓN-RUIZ, B.; LERMA, J. L. Augmented reality application assessment for disseminating rock art. *Multimedia Tools and Applications*, Multimedia Tools and Applications, 9 2018. ISSN 1380-7501. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11042-018-6609-x>.

BÜTTNER, S. et al. The Design Space of Augmented and Virtual Reality Applications for Assistive Environments in Manufacturing: A Visual Approach. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. [s.n.], 2017. p. 433–440. ISBN 978-1-4503-5227-7. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/3056540.3076193>.

- CARDOSO, L. F. de S.; MARIANO, F. C. M. Q.; ZORZAL, E. R. A Survey of Industrial Augmented Reality. *Computers & Industrial Engineering*, p. 106159, 11 2019. ISSN 03608352. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036083521930628X>.
- CHALHOUB, J.; AYER, S. K. Using Mixed Reality for electrical construction design communication. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 86, n. May 2017, p. 1–10, 2018. ISSN 09265805. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.10.028>.
- CHAN, M. R. K. W. *A estratégia do oceano azul: como criar novos mercados e tornar a concorrência irrelevante*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005. 241 p.
- CHU, D.; ANDREASSI, T. Management of technological innovation. *Management Research: Journal of the Iberoamerican Academy of Management*, v. 9, n. 1, p. 7–31, 2011. ISSN 1536-5433. Disponível em: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/1536-541111131647>.
- DANIELSSON, O. et al. Assessing Instructions in Augmented Reality for Human-robot Collaborative Assembly by Using Demonstrators. *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., v. 63, p. 89–94, 2017. ISSN 22128271. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.038>.
- DAVISON, A. J. et al. MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 29, n. 6, p. 1052–1067, 6 2007. ISSN 0162-8828. Disponível em: <https://academic.oup.com/aesa/article-lookup/doi/10.1603/AN10099http://ieeexplore.ieee.org/document/4160954/>.
- DOSHI, A. et al. Use of projector based augmented reality to improve manual spot-welding precision and accuracy for automotive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 89, n. 5-8, p. 1279–1293, 2017. ISSN 14333015.
- DUNN, O. J. Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, v. 6, n. 3, p. 241–252, 8 1964. ISSN 0040-1706. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00401706.1964.10490181>.
- FAA, F. A. A. *Aviation Maintenance Technician Handbook—Airframe*. 2012. 588 p. Disponível em: <https://www.faa.gov/regulations/policies/handbooks/manuals/aircraft/amt/airframe/handbook/>.
- FANG, H. C.; ONG, S. K.; NEE, A. Y. A novel augmented reality-based interface for robot path planning. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, v. 8, n. 1, p. 33–42, 2014. ISSN 19552513.
- FRAGA-LAMAS, P. et al. A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *IEEE Access*, v. 6, p. 13358–13375, 2018. ISSN 2169-3536. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8298525/>.
- GAŠOVÁ, M.; GAŠO, M.; ŠTEFÁNIK, A. Advanced Industrial Tools of Ergonomics Based on Industry 4.0 Concept. *Procedia Engineering*, v. 192, p. 219–224, 2017. ISSN 18777058.
- GIMENO, J. et al. A new AR authoring tool using depth maps for industrial procedures. *Computers in Industry*, v. 64, n. 9, p. 1263–1271, 2013. ISSN 01663615.

- GODOI, L. d. S. C. e. F. *ESTRATIFICAÇÃO DE AMBIENTES PARA SELEÇÃO DE HÍBRIDOS DE MILHO*. Uberlândia, 2016. 37 p. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/17882/1/EstratificaoAmbientesSeleo.pdf>.
- GROENEGRESS, C.; RITZ, S. Augmented Reality - Transfer of Presentation Techniques to the Cockpit. *ATZ elektronik*, v. 8, p. 8–12, 2014.
- GUPTA, R. K. et al. Gathering, evaluating and managing customer feedback during aircraft production. *Computers and Industrial Engineering*, Elsevier, v. 115, n. May 2017, p. 559–572, 2018. ISSN 03608352. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.012>.
- GUREVICH, P.; LANIR, J.; COHEN, B. *Design and Implementation of TeleAdvisor: a Projection-Based Augmented Reality System for Remote Collaboration*. [S.l.: s.n.], 2015. v. 24. 527–562 p. ISSN 15737551. ISBN 09259724 (ISSN).
- HAN, P.; ZHAO, G. Line-based initialization method for mobile augmented reality in aircraft assembly. *Visual Computer*, Springer Berlin Heidelberg, v. 33, n. 9, p. 1185–1196, 2017. ISSN 01782789.
- HAO, Y.; HELO, P. The role of wearable devices in meeting the needs of cloud manufacturing: A case study. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, v. 45, p. 168–179, 2017. ISSN 07365845. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.10.001>.
- HOLM, M. et al. Adaptive instructions to novice shop-floor operators using Augmented Reality. *Journal of Industrial and Production Engineering*, Taylor & Francis, v. 34, n. 5, p. 362–374, 2017. ISSN 21681023. Disponível em: <http://doi.org/10.1080/21681015.2017.1320592>.
- KHAN, D.; ULLAH, S.; RABBI, I. Factors affecting the design and tracking of ARToolKit markers. *Computer Standards and Interfaces*, Elsevier B.V., v. 41, p. 56–66, 2015. ISSN 09205489. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csi.2015.02.006>.
- KLEIN, G.; MURRAY, D. Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces. In: *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE, 2007. v. 20, n. 6, p. 1–10. ISBN 978-1-4244-1749-0. ISSN 10006818. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4538852/>.
- LAMBERTI, F. et al. Challenges, opportunities, and future trends of emerging techniques for augmented reality-based maintenance. *IEEE Transactions on emerging topics in computing*, v. 2, n. 4, p. 411–421, 2015. ISSN 21686750.
- LIMA, J. P. et al. Markerless tracking system for augmented reality in the automotive industry. *Expert Systems with Applications*, Elsevier Ltd, v. 82, p. 100–114, 2017. ISSN 09574174. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2017.03.060>.
- LIU, C. et al. Augmented Reality-assisted Intelligent Window for Cyber-Physical Machine Tools. *Journal of Manufacturing Systems*, The Society of Manufacturing Engineers, v. 44, p. 280–286, 2017. ISSN 02786125. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.04.008>.
- LIU, F.; SEIPEL, S. On the precision of third person perspective augmented reality for target designation tasks. *Multimedia Tools and Applications*, Multimedia Tools and Applications, v. 76, n. 14, p. 15279–15296, 2017. ISSN 15737721.

- MAKRIS, S. et al. Augmented reality system for operator support in human–robot collaborative assembly. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, CIRP, v. 65, n. 1, p. 61–64, 2016. ISSN 17260604. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.038>.
- MAKRIS, S. et al. Assembly support using AR technology based on automatic sequence generation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, CIRP, v. 62, n. 1, p. 9–12, 2013. ISSN 00078506. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.095>.
- MENDOZA, M. et al. Augmented Reality as a Tool of Training for Data Collection on Torque Auditing. *Procedia Computer Science*, Elsevier Masson SAS, v. 75, n. Vare, p. 5–11, 2015. ISSN 18770509. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.186>.
- MEYERS, P. Implementation of industrial process innovations: factors, effects, and marketing implications. *Journal of Product Innovation Management*, v. 16, n. 3, p. 295–311, 1999. ISSN 07376782. Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0032681530&partnerID=tZOtx3y1>.
- MICHALOS, G. et al. Augmented Reality (AR) Applications for Supporting Human-robot Interactive Cooperation. In: *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 2016. v. 41, p. 370–375. ISBN 2212-8271. ISSN 22128271. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.005>.
- MILGRAM, P.; KISHINO, F. A taxonomy of mixed reality visual display. *IEICE Trans. Inf. & Sys., D*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, v. 77, n. 12, p. 1321–1329, 1994. ISSN 09168532. Disponível em: <http://ci.nii.ac.jp/naid/110003209335/en/>.
- NEE, A. Y. et al. Augmented reality applications in design and manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, CIRP, v. 61, n. 2, p. 657–679, 2012. ISSN 00078506. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.010>.
- NIELSEN, J. *Usability Engineering*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1993. ISBN 0125184050.
- NOVAK-MARCINCIN, J. et al. Augmented reality aided manufacturing. In: *Procedia Computer Science*. Elsevier Masson SAS, 2013. v. 25, p. 23–31. ISBN 1877-0509. ISSN 18770509. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.004>.
- ONG, S. K.; ZHU, J. A novel maintenance system for equipment serviceability improvement. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, CIRP, v. 62, n. 1, p. 39–42, 2013. ISSN 00078506. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.091>.
- PALMARINI, R. et al. A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 49, n. June 2017, p. 215–228, 2018. ISSN 07365845.
- PERUZZINI, M. et al. A mixed-reality digital set-up to support design for serviceability. *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., v. 17, p. 499–506, 2018. ISSN 2351-9789. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235197891831206X>.
- PINTZOS, G. et al. A novel approach for the combined use of AR goggles and mobile devices as communication tools on the shopfloor. *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., v. 25, n. C, p. 132–137, 2014. ISSN 22128271. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.021>.

PREECE, J.; SHARP, H.; ROGERS, Y. *Interaction Design - Beyond Human-Computer Interaction*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002. 519 p. ISBN 0-471-49278-7.

RE, G. M.; OLIVER, J.; BORDEGONI, M. Impact of monitor-based augmented reality for on-site industrial manual operations. *Cognition, Technology and Work*, Springer London, v. 18, n. 2, p. 379–392, 2016. ISSN 14355566.

RICE, M. et al. Comparing Three Task Guidance Interfaces for Wire Harness Assembly. In: *2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2016. p. 2279–2284. ISBN 9781450340823.

RODRIGUEZ, L. et al. Developing a Mixed Reality Assistance System Based on Projection Mapping Technology for Manual Operations at Assembly Workstations. In: *Procedia Computer Science*. Elsevier Masson SAS, 2015. v. 75, n. Vare, p. 327–333. ISBN 1877-0509. ISSN 18770509. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.254>.

SCHALL, G.; ZOLLMANN, S.; REITMAYR, G. Smart Vidente: Advances in mobile augmented reality for interactive visualization of underground infrastructure. *Personal and Ubiquitous Computing*, v. 17, n. 7, p. 1533–1549, 2013. ISSN 16174909.

SIEGEL, S. *Estatística Não-paramétrica para Ciências do Comportamento*. Porto Alegre, RS: Artmed, 2006. 448 p. ISBN 8536307293.

SOMMERVILLE, I. *Engenharia de software, 8ª edição*. 8ª. ed. São Paulo: Pearson Addison-Wesley, 2007. 552 p. ISBN 975-85-88639-28-7.

SUÁREZ-WARDEN, F. et al. Assembly Operations Aided by Augmented Reality: An Endeavour toward a Comparative Analysis. *Procedia Computer Science*, Elsevier Masson SAS, v. 75, n. Vare, p. 281–290, 2015. ISSN 18770509. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.249>.

TAMAAZOUSTI, M. et al. The constrained SLAM framework for non-instrumented augmented reality: Application to industrial training. *Multimedia Tools and Applications*, Multimedia Tools and Applications, v. 75, n. 16, p. 9511–9547, 2016. ISSN 15737721. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11042-015-2968-8>.

TATIĆ, D.; TEŠIĆ, B. The application of augmented reality technologies for the improvement of occupational safety in an industrial environment. *Computers in Industry*, v. 85, p. 1–10, 2017. ISSN 01663615.

The R Development Core Team. *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 2. ISBN 3900051070.

TORI, R.; HOUNSELL, M. d. S. o. *Introdução a realidade virtual e aumentada*. Porto Alegre: Editora SBC, 2018. 940 p. ISBN 978-85-7669-446-5.

TORI, R.; KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. *Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada*. Belém - PA: Editora SBC - Sociedade Brasileira de Computação, Porto Alegre, 2006, 2006. 412 p. ISBN 85-7669-068-3.

TRIOLA, M. F. *Introdução à Estatística*. 10. ed. [S.l.]: LTC, 2008. 836 p. ISBN 9788521633747.

- TZIMAS, E.; VOSNIAKOS, G.-C.; MATSAS, E. Machine tool setup instructions in the smart factory using augmented reality: a system construction perspective. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, Springer Paris, 2018. ISSN 1955-2513. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12008-018-0470-z>.
- Unity Technologies. *Unity User Manual (2019.2)*. 2019. Disponível em: <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html>.
- WANG, X.; ONG, S. K.; NEE, A. Y. Multi-modal augmented-reality assembly guidance based on bare-hand interface. *Advanced Engineering Informatics*, Elsevier Ltd, v. 30, n. 3, p. 406–421, 2016. ISSN 14740346. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2016.05.004>.
- WANG, X. et al. Integrating Augmented Reality with Building Information Modeling: Onsite construction process controlling for liquefied natural gas industry. *Automation in Construction*, Elsevier B.V., v. 40, p. 96–105, 2014. ISSN 09265805. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.12.003>.
- WANG, Y. et al. Point cloud and visual feature-based tracking method for an augmented reality-aided mechanical assembly system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 99, n. 9-12, p. 2341–2352, 12 2018. ISSN 0268-3768. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-018-2575-8>.
- WANG, Y. et al. Mechanical assembly assistance using marker-less augmented reality system. *Assembly Automation*, v. 38, n. 1, p. 77–87, 2018. ISSN 01445154.
- WESTERFIELD, G.; MITROVIC, A.; BILLINGHURST, M. Intelligent augmented reality training for motherboard assembly. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, v. 25, n. 1, p. 157–172, 2015. ISSN 15604306.
- WU, L.-C.; LIN, I.-C.; TSAI, M.-H. Augmented Reality Instruction for Object Assembly based on Markerless Tracking. In: *I3D '16 Proceedings of the 20th ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. [s.n.], 2016. p. 95–102. ISBN 9781450340434. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1145/2856400.2856416>.
- XU, J. et al. Fast Registration Methodology for Fastener Assembly of Large-Scale Structure. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 64, n. 1, p. 717–726, 2017. ISSN 02780046.
- XUE, J.; ZHAO, G.; TAN, D. A motion parallax rendering approach to real-time stereoscopic visualization for aircraft virtual assembly. In: *Proceedings of the 2012 International Conference on Virtual Reality and Visualization*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2012. p. 1–6. ISBN 9780769548364. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ICVRV.2012.9>.
- ZALDÍVAR-COLADO, U. et al. A Mixed Reality for Virtual Assembly. 2017.
- ZHU, J.; ONG, S. K.; NEE, A. Y. A context-aware augmented reality system to assist the maintenance operators. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, v. 8, n. 4, p. 293–304, 2014. ISSN 19552505.
- ZIMMER, C. et al. Mobile previsualization using augmented reality. *SIGGRAPH Asia 2017 Mobile Graphics & Interactive Applications on - SA '17*, p. 1–5, 2017. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3132787.3132805>.

GLOSSÁRIO

CAD – *Computer Aided Design*

CV – *Coeficiente de Variação*

GPS – *Global Positioning System*

HMD – *Head-Mounted Display*

NFT – *Natural Feature Tracking*

PTAM – *Parallel Tracking and Mapping*

RA – *Realidade Aumentada*

RM – *Realidade Misturada*

RV – *Realidade Virtual*

SDK – *Software Development Kit*

SVR – *Symposium on Virtual and Augmented Reality*

VA – *Virtualidade Aumentada*

Anexo A

APROVAÇÃO COMITÊ DE ÉTICA



COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA



São Paulo, 13 de setembro de 2018
CEP N [1579100918](#)

COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO PROJETO AO COMITÊ DE ÉTICA DA UNIFESP

CPF: [385.932.148-00](#)

Título do projeto: [Utilização de realidade aumentada para montagens de estruturas metálicas: Uma aplicação na indústria aeronáutica.](#)

Pesquisador: [Luis Fernando de Souza Cardoso](#)

Celular: [12988508324](#)

e-mail: cardoso.luisf@gmail.com

O Comitê de Ética da Universidade Federal de São Paulo/Hospital São Paulo terá o prazo máximo de 30 dias para emissão do parecer. Todo o processo poderá ser acompanhado no sistema (www.cepunifesp.com.br) através do seu código de acesso.

Atenciosamente,

Prof. Dr. Miguel Roberto Jorge
Coordenador do Comitê de Ética em Pesquisa
Universidade Federal de São Paulo/Hospital São Paulo

Anexo B

PARTICIPAÇÃO SVR



This is to certify that **Luís Fernando de Souza Cardoso** participated in the XX Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR 2018), Foz do Iguaçu PR, October 29th - November 1st, 2018.

REALIZATION

Insper

UTFPR
CÂMPUS CORNELIO PROCOPIO



UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO

IMB METRÓPOLE
DIGITAL

INSTITUTO FEDERAL
Pernambuco
Campus Belo Jardim



Luciano Pereira Soares

Luciano Pereira Soares
General chair

SPONSORS

CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico

NVIDIA



absolut
technologies

Itaú

Anexo C

APRESENTAÇÃO SVR



CERTIFICATE

This is to certify that the paper entitled **Uma revisão da Realidade Aumentada em ambientes de produção**, from **Luis Fernando de Souza Cardoso, Ezequiel Roberto Zorzal**, was presented in the XX Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR 2018), Foz do Iguaçu PR, October 29th - November 1st, 2018.

REALIZATION

Insper

UTFPR
CÂMPUS CORNELIO PROCOPIO



UNIVERSIDADE
FEDERAL
DE PERNAMBUCO

IMD
METRÓPOLE
DIGITAL

INSTITUTO FEDERAL
Pernambuco
Campus Belo Jardim



Luciano Pereira Soares
General chair

SPONSORS

CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico

NVIDIA



absolut
technologies

Itaú

Anexo D

PUBLICAÇÃO COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING



ScienceDirect

Journals & Books

Create account

Sign in



Get Access

Share

Export



Computers & Industrial Engineering

Available online 15 November 2019, 106159

In Press, Journal Pre-proof

A Survey of Industrial Augmented Reality

Luís Fernando de Souza Cardoso ^{a, b}, Flávia Cristina Martins Queiroz Mariano ^a, Ezequiel Roberto Zorzal ^a

Show more

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106159>

Get rights and content

Highlights

- State of the art review of Augmented Reality in industrial environments.
- Augmented Reality applications to improve complexes process.
- Wearable devices and markerless tracking are tendencies to improve Augmented Reality applications in production environments.
- Considerations to implement Augmented Reality
- Future developments to improve Augmented Reality use in industrial environments.

Abstract

This article aims to evaluate the impact of Augmented Reality (AR) applicability and usefulness on real industrial processes by employing a systematic literature review (SLR). The SLR was performed in five digital libraries to identify articles and reviews concerning the AR applicability from 2012 to 2018. A patent search in Google's patents database was also conducted, for the same period. This paper describes how AR has been applied, which industries are most interested in the technology, how the technology has been developed to meet industry needs, as well as the benefits and challenges of AR. This survey concludes by providing a starting point for

companies interested in integrating AR into their processes and proposing future directions for AR developers and researchers.

Keywords

Augmented Reality; Mixed Reality; Process Innovation; Industrial Process; Production Environment; Industry 4.0

[Recommended articles](#) [Citing articles \(0\)](#)

[View full text](#)

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

ELSEVIER

[About ScienceDirect](#) [Remote access](#) [Shopping cart](#) [Advertise](#) [Contact and support](#)
[Terms and conditions](#) [Privacy policy](#)

We use cookies to help provide and enhance our service and tailor content and ads. By continuing you agree to the [use of cookies](#).

Copyright © 2019 Elsevier B.V. or its licensors or contributors. ScienceDirect® is a registered trademark of Elsevier B.V.

